

00-0385/001

Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen HGZ-Faserstopfmörteln und Naturstein unter Bewitterung

Berichte zur Denkmalpflege-Forschung

Dipl.-Ing. A. Rinne

Dr.-Ing. R. Marzaganov

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
D-38100 Braunschweig

November 1994

Gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie
Vorhaben BAU 7025 B

INHALTSVERZEICHNIS

1	Problemstellung und Vorgehen	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Dauerhaftigkeit von Fugenmörtel	2
1.3	Verbundmodell	4
1.4	Versuchsprogramm	5
1.5	Versuchstechnik	8
	1.5.1 Meßtechnik unter Bewitterung	10
	1.5.2 Prüfverfahren	11
1.6	Mörtelmodifikation	13
2	Ergebnisse	16
2.1	Eigenschaften der Natursteine	16
	2.1.1 Chemisch-Mineralogische Eigenschaften	16
	2.1.2 Physikalisch-mechanische Eigenschaften	17
2.2	Mörteleigenschaften	23
	2.2.1 Chemisch-mineralogische Eigenschaften	24
	2.2.2 Physikalisch-mechanische Eigenschaften	25
2.3	Verbunduntersuchungen	29
	2.3.1 Versuchsprogramm	29
	2.3.2 Ergebnisse mit Harzer Dolomit	30
	2.3.3 Ergebnisse mit Sander Schilfsandstein	33
	2.3.4 Ergebnisse mit Rühener Grünsandstein	35
	2.3.5 Ergebnisse mit Zwickauer Kohlesandstein	36
3	Auswertung und weiteres Vorgehen	38
	Literatur	41
	Anhang	43

1 Problemstellung und Vorgehen

1.1 Einleitung

Im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen an historischen Bauwerken aus Natursteinmauerwerk ist oftmals eine Sanierung der Fugen erforderlich. Der Verfugmörtel soll dem Lastabtrag und insbesondere dem Witterungsschutz für das Mauerwerk dienen. Diese Aufgabe kann nur dann erfüllt werden, wenn eine rißfreie Haftung des Verfugmörtels am Stein unter thermisch-hygrischen Witterungseinwirkungen gewährleistet werden kann. Die Qualität des Stein-Mörtel-Verbundes ist somit ein Maß für die Dauerhaftigkeit, die "Lebenserwartung" der Verfugung.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden etliche fehlerhafte Neuverfugungen durchgeführt: oft wurden Mörtelsysteme verwandt, die sich an anderen Objekten unter vollkommen anderen Bedingungen bewährt hatten; auf das Anlegen von Musterflächen oder gar auf Verträglichkeitsuntersuchungen zwischen Altmaterial und Verfugmörtel wurde verzichtet. An den sanierten Objekten traten große Schäden wie insbesondere standfestigkeitsvermindernde Treibreaktionen auf, deren Sanierung wesentlich aufwendiger ist als der ursprüngliche Schaden. Man erkannte aus diesen Fehlern, daß zur fachgerechten und dauerhaften Sanierung auf eine Optimierung des zur Neuverfugung vorgesehenen Mörtels hinsichtlich der gegebenen baulichen Situation nicht verzichtet werden kann. Die Auswahl des richtigen Mörtels für die Instandsetzung von Natursteinmauerwerken muß stets objektspezifisch erfolgen und mit sorgfältigen Untersuchungen und Prüfungen einhergehen /1/.

Die BMFT-Forschung zur Denkmalpflege befaßt sich mit dieser objektspezifischen Mörtelanpassung. In Niedersachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt gibt es eine Vielzahl von historischen Bauten, die mit Gipsmörtel errichtet wurden. Aus diesem Grund entwickelte das Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) einen fasergemagerten Mörtel, dessen Bindemittel speziell für die Sanierung von gipshaltigem Natursteinmauerwerk vorgesehen ist

/2/. Es fanden umfassende Untersuchungen zur Verträglichkeit zwischen Gipsmörteln und dem neu entwickeltem Mörtel statt /3/. Daran knüpften systematische Versuchsreihen an der MPA Braunschweig /4/ zum Verbundverhalten zwischen verschiedenen Natursteinen und diesem Fasermörtel an. Diese Untersuchungen fanden zunächst ausschließlich im Normklima bei 20°C und 65 % r.F. statt und gingen in Abhängigkeit vom entsprechenden Naturstein mit einigen Modifizierungen der Mörtelrezeptur einher. Mit diesen optimierten Rezepturen konnte eine Haftzugfestigkeit als Maßstab für die Haftung zwischen Stein und Mörtel erzielt werden.

Der sich anschließende Schritt erforderte den Nachweis der Dauerhaftigkeit des Mörtel-Stein-Verbundes an der Witterung. Das bedeutet, daß der Einfluß der Witterung im jahreszeitlichen und täglichen Wechsel auf die Verbundqualität erfaßt werden muß. Die im folgenden vorgestellten Untersuchungen der MPA BS beschäftigen sich mit der Witterungsbeständigkeit des Fasermörtels und der Auswirkung der Bewitterung auf die Verbundqualität.

1.2 Dauerhaftigkeit von Fugenmörtel

Die Dauerhaftigkeit einer Verfügung läßt sich im wesentlichen durch drei Eigenschaftsanforderungen definieren: der chemisch-mineralogischen Verträglichkeit des Verfugmörtels mit im Mauerwerk vorhandenen Stoffen, dem Haftverbund zwischen Verfugmörtel und Naturstein sowie der Witterungsbeständigkeit des Verfugmörtels. Alle drei Anforderungen sind gleichrangig und können zu unterschiedlichen Mörtelsystemen führen.

Im Rahmen der BMFT-Forschung wurden mehrere historische Bauwerke zu sogenannten Pilotobjekten erklärt, deren Altmörtel im wesentlichen aus Gips besteht. Somit war die Auswahl möglicher Mörtelsysteme durch die Verträglichkeitsanforderung gegenüber dem Gipsmörtel eingeschränkt. Es wurde ein Mörtelbindemittel aus Hüttensand, Gips und Zement (HGZ) /2/ entwickelt, das diese

Anforderung erfüllt. Der Erhärtungsmechanismus beruht auf der sulfatisch/basisch angeregten Hydratation des Hüttensands. Die Sulfatbeständigkeit ist in zahlreichen Untersuchungen und Ringversuchen bestätigt worden /3/. Das HGZ-Bindemittel ist jedoch nicht verträglich gegenüber Portlandzement. Ein Kontakt mit Zementinjektionen oder Zementmörteln muß deshalb vermieden werden.

Für den Haftverbund zwischen Mörtel und Naturstein sind sowohl bestimmte Mörtелеigenschaften als auch Natursteineigenschaften maßgebend. Die entscheidenden Mörtелеigenschaften sind Haftzug- und Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul und die hygrischen Verformungen. Haftzug- und Zugfestigkeit können durch eine Bewehrung des Mörtels verbessert werden. Eine Bewehrung mit Ligno-Cellulose-Fasern (LCF) bewirkt zusätzlich die willkommene Reduktion des Elastizitätsmoduls. Der Verbundwerkstoff erhält rißüberbrückende Eigenschaften. Die Faserzugabe führt jedoch auch zur Erhöhung des Wasseranspruchs und zu erhöhten hygrischen Verformungen. Durch Zwangsmischung kann der Mörtel in einer knetbaren Konsistenz hergestellt werden, was insbesondere bei tiefreichender Verfüllung vorteilhaft ist /5/. Der Einfluß des Natursteins beruht im wesentlichen auf dessen Porenstruktur. So beeinflussen die hygrischen Eigenschaften - Wasseraufnahme, Kapillaraktivität - des Natursteins den Haftverbund durch Wasserentzug aus dem Mörtel. Auch die Porenverteilung des Natursteins kann ausschlaggebend für einen guten Verbund sein: die Haftung zwischen einem sehr porösen Stein und einem Mörtel wird allein schon durch die mechanische Verzahnung begünstigt. Ein sehr dichter Stein dagegen bietet keinerlei Verzahnungsmöglichkeit.

Die Witterungsbeständigkeit muß sowohl für den Verbundwerkstoff gegeben sein als auch jeweils für die Bindemittelmatrix und die Faser. Der Feuchte- und Temperaturhaushalt des oberflächennahen Bauwerksbereichs wird durch die Wettergrößen bestimmt, die somit die Verbundqualität zwischen Naturstein und Fugenmörtel maßgeblich beeinflussen. Dieser Komplex aus Wettergrößen und Haftverbund ist Gegenstand des vorliegenden Berichts. Die Witterungs-

beständigkeit des Mörtels wurde in zahlreichen Laborversuchen und durch mehrjährige natürliche Bewitterung bestätigt. Die Beständigkeit der LCF in der Bindemittelmatrix wird durch die alkalische Pufferkapazität bestimmt. Eine Alkalikorrosion der LCF kann bei geeigneter Zusammensetzung des Bindemittels ausgeschlossen werden /6/. An mehrjährig ausgelagerten Probewänden wurde zusätzlich die Gefahr der mikrobiologischen Zersetzung der LCF untersucht /7/. An der Oberfläche wurde Kontamination festgestellt, das Eindringen in größere Tiefen wird durch die hohe Dichte verhindert. Infolge der Absenkung des pH-Wertes auf 8-9 nach drei Jahren Auslagerung führt die Kontamination an der Oberfläche nicht zur Zersetzung der Cellulose. Eine weitere Verbesserung der mikrobiologischen Beständigkeit wird zukünftig durch Zusatz von Schwermetallsalzen angestrebt.

1.3 Verbundmodell

Das Dauerhaftigkeitskriterium des Haftverbundes ist die Rißbildung in der Fuge. Rißbildung tritt ein, wenn die Einwirkungen S auf den Haftverbund größer sind als sein Widerstand R . Im bewitterten Mauerwerksausschnitt stellen sich im Stein und Mörtel entsprechend der Porenstruktur und der Witterungseinwirkung Feuchte- und Temperaturgradienten ein (Abb. 1.1). Diese sind mit thermischen und hygrischen Verformungen ϵ_{AT} bzw. ϵ_{AF} des erhärtenden oder erhärteten Mörtels verbunden. Da Verformungen normal zur Fugenflanke durch die Steinflanken gezwängt sind, entstehen Zwangsspannungen σ_{2W} normal zur Steinflanke. Längs der Fuge sind die Verformungen durch inneren Zwang behindert, und es entstehen Eigenspannungen σ_E . Die Größe der auf den Haftverbund einwirkenden Spannungen ist orts- und zeitabhängig und unterliegt der Spannungsrelaxation.

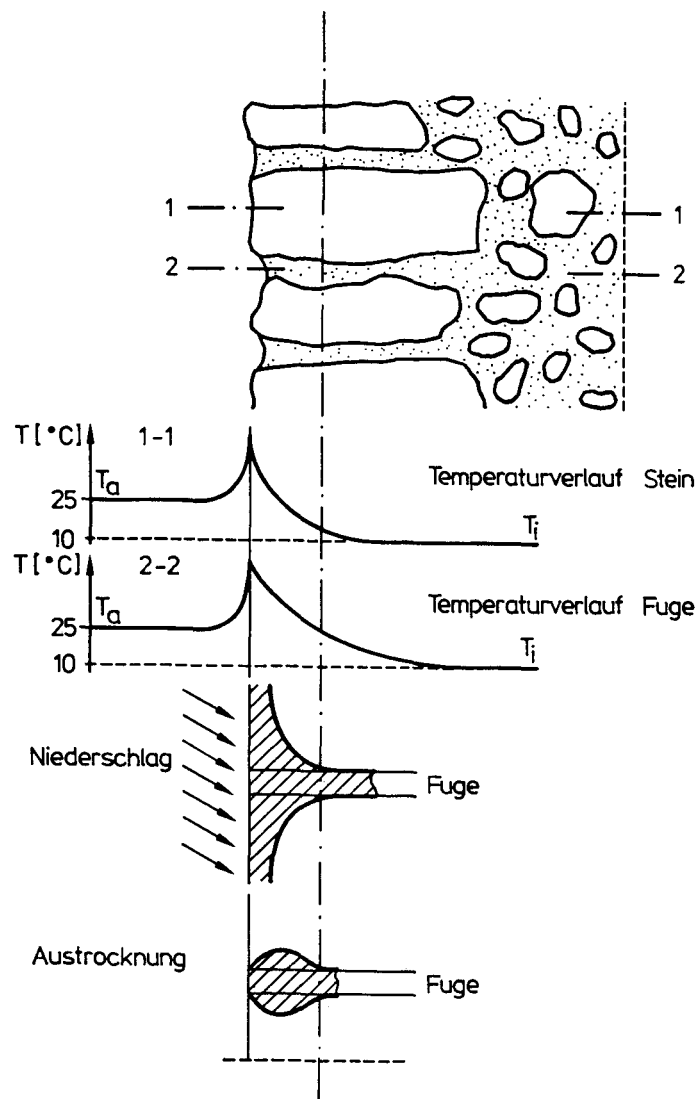


Abb. 1.1: Temperatur- und Feuchtegradient im Mauerwerk

Der Widerstand R des Haftverbundes wird durch die Zugfestigkeit des Steins β_{zSt} , die Zugfestigkeit des Mörtels $\beta_{zMö}$ und die Haftzugfestigkeit β_{Hz} beschrieben. Die Größe mit dem geringsten Wert ist maßgebend. Alle Größen streuen beträchtlich. Da die Zugfestigkeitswerte vom Feuchtegehalt abhängig sind, ist der Widerstand R orts- und zeitabhängig:

$$R_{x,t} = \min (\beta_{Hz}, \beta_{zSt}, \beta_{zMö})$$

Wenn die Dauerhaftigkeit erschöpft ist ($R < S$), tritt Rißbildung ein. Zwangsspannungen führen zu Flankenabrissen, Eigenspannungen zu Querrissen im Mörtel.

1.4 Versuchsprogramm

Ein Programm zur Untersuchung des Haftverbundes unter Bewitterung muß verschiedene Punkte berücksichtigen. Es muß die Frage nach der Bewitterungsart und -dauer geklärt werden, und welche Natursteine und Mörtel für die Verbundkörper gewählt werden sollen. Welche ihrer Materialeigenschaften sind für die Verbundproblematik interessant, und schließlich welche Meßgrößen geben eine Auskunft über die Verbundqualität?

Als Bewitterungsart wurden sowohl die künstliche Bewitterung in der Klimakammer als auch die natürliche Bewitterung an zwei klimatisch verschiedenen Orten erprobt. Für die künstliche Bewitterung spricht, daß die klimatischen Bedingungen von außen steuerbar sind. Die Zahl der Klimaeinflüsse kann auf wenige Größen reduziert werden, um so die Auswirkung einer bestimmten Größe ohne die Beeinflussung anderer zu erkennen. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden in der Klimakammer konstant 20 °C und zyklisch 85 bzw. 35 % r.F. eingestellt. Zusätzlich wurde zweimal Niederschlag simuliert. Darüberhinaus läßt sich das Klimaprogramm auch als Zeitraffer gestalten, so daß die Gesamtdauer der Bewitterung im Vergleich zur natürlichen Bewitterung stark verkürzt werden kann. Bei der Auslagerung im Freien wirken die natürlichen Wetterzyklen auf den Prüfkörper ein. Tages- und Jahresgang der Wettergrößen sind kompliziert und in der Klimakammer nur durch erheblichen Aufwand zu realisieren. Nicht zuletzt sprechen die niedrigeren Kosten für die natürliche Bewitterung. Als Auslagerungsort wurde das Gelände der MPA in Braunschweig und eine Freifläche des Klosters in Walkenried im Südharz ausgewählt. Das Klima in der Braunschweiger Gegend gilt als typisch für den mitteldeutschen Raum, der Südharz dagegen zeich-

net sich durch höhere Niederschläge und tiefere Temperaturen aus.

Eines der Pilotobjekte des BMFT-Forschungsvorhabens, die St. Johannis Kirche in Ellrich im Südharz, besteht aus Dolomitstein und Gipsmörtel. Ausgewaschene und aufgeweichte Fugen bis in tiefere Bereiche bestimmen das Erscheinungsbild der Kirche. Die Standsicherheit des Mauerwerks ist dadurch gefährdet, so daß eine Neuverfugung dringend erforderlich ist. Der dafür geeignete Mörtel soll im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen entwickelt werden.

Die Wahl der zusätzlich erprobten Natursteine für die Bewitterungsprüfkörper wird durch das Kriterium ihrer hygrischen Eigenschaften bestimmt. So sollten möglichst unterschiedlich stark wassersaugende Gesteinsarten eingesetzt werden. Durch verschiedene Porenstrukturen - geschlossene/offene Poren, hohe/niedrige Gesamtporosität, großer/kleiner mittlerer Porenradius - soll der Einfluß der Porosität auf den Haftverbund bei Verwendung der gleichen Mörtelart ermittelt werden. Folgende Natursteinarten wurden für die Untersuchungen ausgewählt:

Harzer Dolomit
Sander Schilfsandstein
Rüthener Grünsandstein
Zwickauer Kohlesandstein

Diese vier Gesteine unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Porosität deutlich. Zudem beeinflussen die mit dem Gefüge der Gesteinsarten in Zusammenhang stehenden unterschiedlichen Festigkeiten und E-Moduli den Verbund maßgeblich. Daher stellen diese Gesteine auch ganz unterschiedliche Anforderungen an den Mörtel. Die Gesteinseigenschaften werden im einzelnen in Kapitel 2.1 behandelt.

Als Verfugmörtel wurden im Verlaufe von Optimierungsmaßnahmen drei Varianten des gipsverträglichen Fasermörtels und ein markt-

gängiger Sanierputz in das Versuchsprogramm aufgenommen:

HGZ

HGJ

HGQ

Sanierputz

Alle drei Fasermörtel beruhen auf dem Bindemittelsystem Hütten-sand - Gips - Zement. Variiert wurde die dritte Komponente, der Zement. So handelt es sich bei der Zementkomponente des HGZ um PZ 35 F HS und bei den beiden Varianten HGJ und HGQ um zwei Quellzementtypen. Auf der Grundlage dieser Zusammensetzung wurden die Fasermörtel mit Zusatzmitteln versehen, die z.B. die Verarbeitbarkeit oder den Wasser-Bindemittel-Wert beeinflussen. Der "Sanierputz" ist nach Herstellerangaben ebenfalls gipsver-träglich und ist sowohl für Putz- als auch für Verfugarbeiten geeignet. Weitere Angaben zu den Mörtелеigenschaften sind dem Kapitel 2.2 zu entnehmen.

Über den Verlauf der Bewitterungszeit hinweg werden die für die Verbundqualität wichtigsten thermischen und hygrischen Klima-daten aufgezeichnet. Es handelt sich dabei um die Lufttempera-tur, die Luftfeuchtigkeit, die Sonnenenergie, den Niederschlag und den Schlagregen. Vergleichsweise unbedeutend ist der Einfluß von Luftströmungen. Am Bewitterungsprüfkörper selber, insbeson-dere an der Fuge, werden die Steintemperatur und das Dehnen und Schwinden gemessen. Darüberhinaus wird in regelmäßigen Abständen ein Rißbild aufgenommen.

1.5 Versuchstechnik

Die Untersuchungen erforderten die Entwicklung eines speziellen Prüfkörpers. Der bisher /4/ untersuchte Verbundkörper bestand aus zwei Natursteinwürfeln mit 10 cm Kantenlänge und einer La-gerfuge von ca. 1,5 cm Höhe. Der bewitterte Prüfkörper sollte der Situation im Mauerwerk näherkommen. Das bedeutete, daß man

für die aufwendigen Bewitterungsversuche mehr als eine Lagerfuge realisieren und auch die Fugenlänge erhöhen wollte. Außerdem sollte die Zwängung im Mauerwerk simuliert werden. Aus diesen Überlegungen entstand schließlich, wie in Abb. 1.2 dargestellt, ein sogenannter "Drei-Stein-Körper", der die Situation im Mauerwerk hinreichend abbildet /8/.

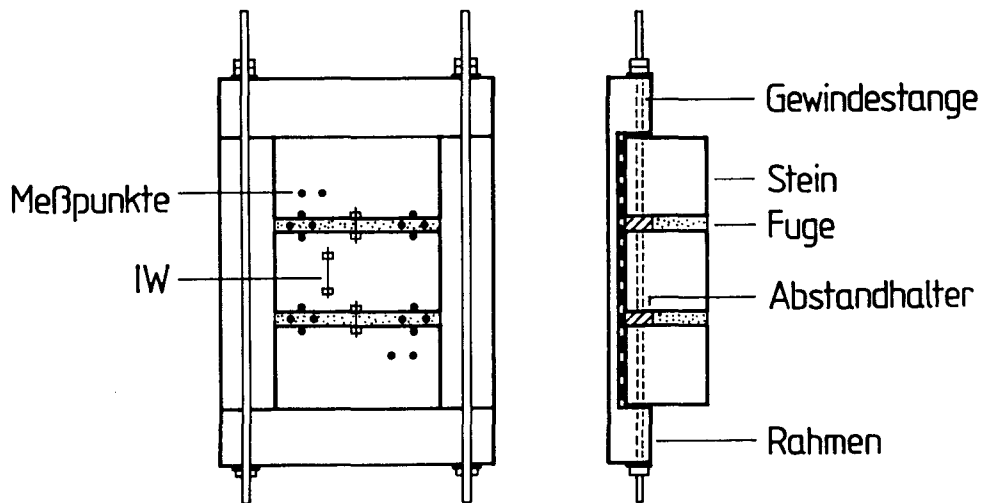


Abb. 1.2: Drei-Stein-Körper, schematisch

Die Steinquader haben jeweils die Maße $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}^3$ und werden mit Hilfe eines Stahlrahmens und Abstandhaltern so fixiert, daß zwei Fugen von je 2 cm Höhe entstehen. Anschließend wird ein Drehmoment von 30 Nm auf die Zugstangen aufgebracht, um die Zwängung im Mauerwerk nachzustellen.

Der Fasermörtel muß mit einem Zwangsmischer hergestellt werden /5/, da er wegen der Faserzugabe eine steife, knetbare Konsistenz aufweisen muß. Nach dem Einstopfen des Mörtels in die Fugen schließt sich eine vierzehntägige Nachbehandlungsphase mit feuchten Tüchern und Folien an, um das Verdunsten von Feuchtigkeit in der wichtigsten Hydratationsphase zu reduzieren. Danach werden die Drei-Stein-Körper seitlich versiegelt und zudem noch mit Schutzblechen über den Seitenflächen versehen, um den Eintrag von Niederschlag zu vermeiden.

1.5.1 Meßtechnik unter Bewitterung

Die Körper werden mit Setzdehnungsmeßstrecken und induktiven Wegaufnehmern (s. Abb. 1.2) ausgestattet, um die Verformungen von Stein und Mörtel infolge der Witterungseinflüsse erfassen zu können. Es werden verschiedenartige Meßstrecken instrumentiert: senkrecht über die Fuge, horizontal auf der Fuge sowie senkrecht und horizontal auf dem Stein. Damit Zusammenhänge zwischen Klimaeinflüssen und der Entwicklung der Verbundqualität erkannt werden können, werden unter Freibewitterung Meßgeräte zur Erfassung der Luftfeuchtigkeit, der Lufttemperatur, der Sonnenenergie, der Niederschlagsmenge und des Schlagregens instrumentiert. Bei den Versuchen in der Klimakammer werden die Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur gemessen. Abb. 1.3 zeigt exemplarisch die aus jeweils 2 bzw. 4 Setzdehnungsmeßstrecken gemittelten Verformungen eines Prüfkörpers in der Klimakammer. Die Luftfeuchtigkeit verlief im wöchentlichen Wechsel zwischen 85 und 35 % r.F. bei konstant 20 °C.

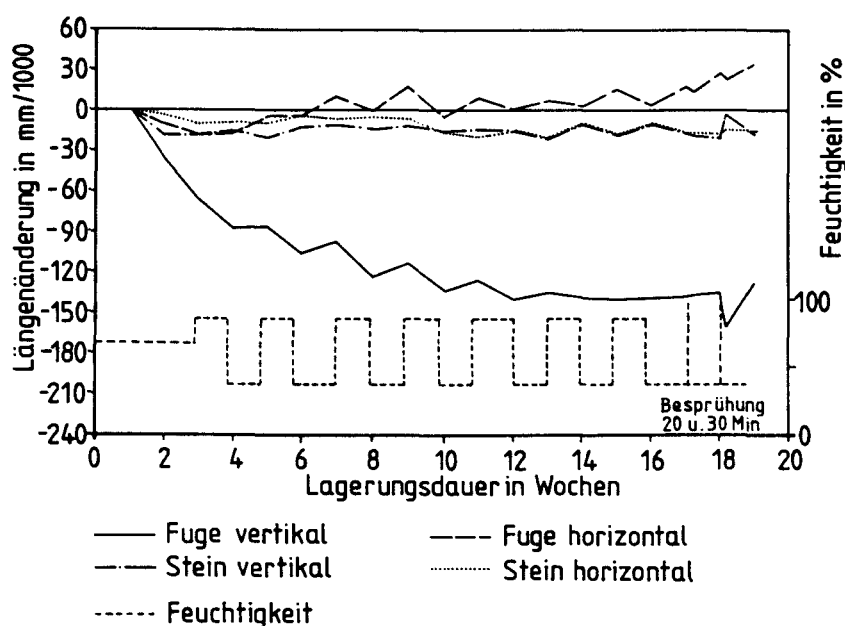


Abb. 1.3: Verformungen des Prüfkörpers S 1

Zusätzlich zur Verformungsmessung wird die Qualität des Verbundes mit der Rißlupe und der Fühlerlehre beurteilt. So können

Risse und deren Tiefe und Öffnungsbreite erkannt und protokolliert werden. Anschließend werden die so präparierten Körper dem betreffenden Klima ausgesetzt und bis zum Prüftermin meßtechnisch überwacht. Die auf dem Freigelände ermittelten Klimadaten werden in den Anlagen A-1 (MPA Braunschweig) und A-2 (Südharz) dargestellt.

1.5.2 Prüfverfahren

Nach Ablauf des Bewitterungszeitraums wird der Drei-Stein-Körper nach dem Schema in Abb. 1.4 geprüft. Zunächst erfolgt der zen-

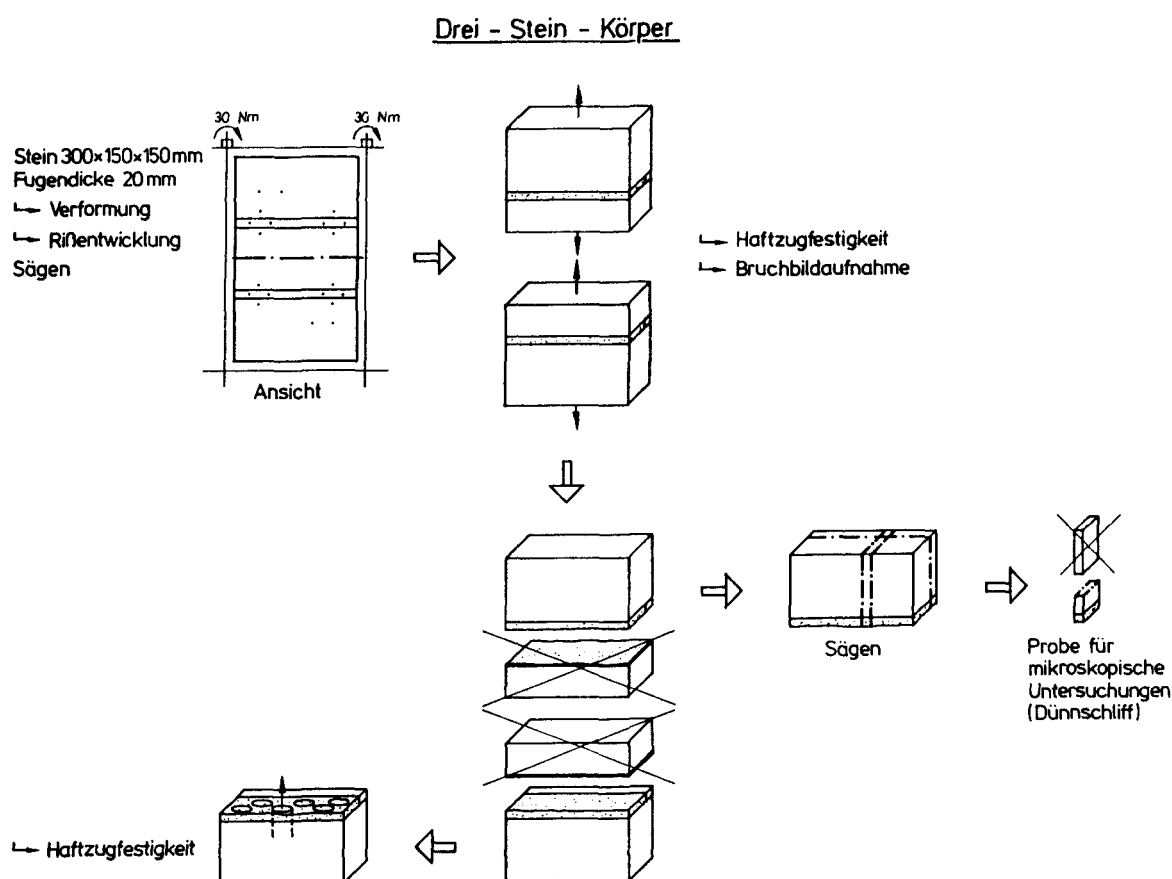


Abb. 1.4: Prüfschema Drei-Stein-Körper

trische Zugversuch an jeder Fuge, d.h. daß der Prüfkörper im mittleren Stein geteilt wird. Aus diesem Versuch erhält man die Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel. Außerdem ergibt die Analyse des Bruchbildes eine visuelle Aussage zur Feuchteverteilung und zur Art des Bruches, zur Veranschaulichung Abb. 1.5.

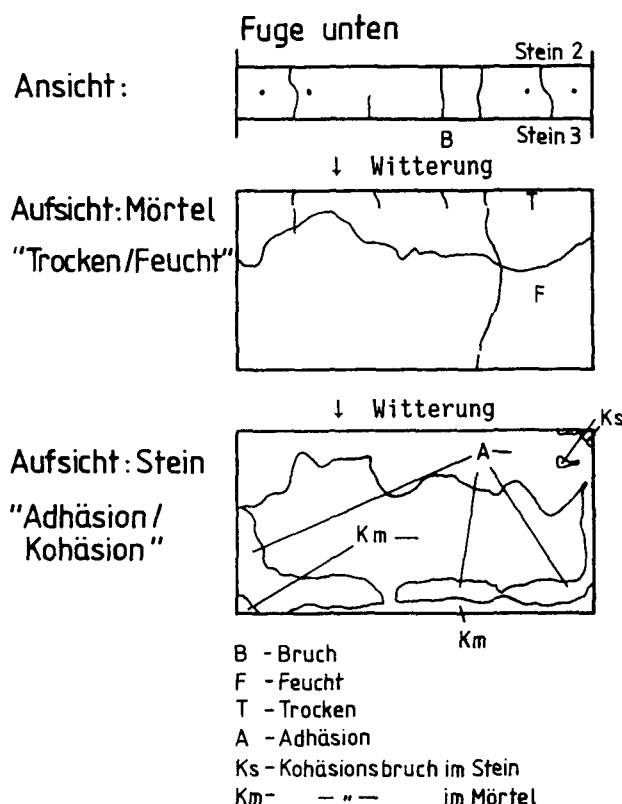


Abb. 1.5: Bruchbildanalyse (Prüfkörper S 1, Fuge unten)

Es kann sich um Bruch im Stein oder im Mörtel - Kohäsionsbruch - oder um ein Versagen an der Kontaktfläche, also um Adhäsionsbruch handeln. Ein absoluter Haftzugfestigkeitswert kann nur bei reinem Adhäsionsbruch ermittelt werden, da es sich bei den Kohäsionsbrüchen um die Zugfestigkeit des betreffenden Materials handelt. In den meisten Fällen stellt sich ein kompliziertes Bruchbild aus mehreren Brucharten ein. Im Anhang wurden die Bruchbilder einiger Prüfkörper beigelegt.

An ausgewählten Prüfkörpern oder auch an solchen Prüfkörpern, die schon vor Ermittlung der Haftzugfestigkeit versagten, kann dann nochmals die Haftzugfestigkeit nach DIN 18555, Teil 6 /9/ ermittelt werden. Bei diesem Verfahren werden Bohrungen senk-

recht zur Steinflanke in den Mörtel-Stein-Verbund gesetzt und anschließend zentrisch gezogen. Durch die Anordnung der Bohrungen können Abhängigkeiten von der Fugentiefe erkannt werden. Darüber hinaus werden Dünnschliffe aus dem Kontaktbereich Mörtel-Stein angefertigt, um Ursachen für das Eintreten oder Ausbleiben des Verbundes zu erkennen.

1.6 Mörtelmodifikation

Im Laufe der Verbundkörperuntersuchungen an Zwei-Stein-Körpern /4/ stellten sich einige Probleme hinsichtlich der Haftung am Stein, der Verarbeitbarkeit und des Schwindens des Mörtels sowie der Witterungsbeständigkeit des Fugenstopfmörtels ein. Diesen Problemen wurde mit verschiedenen Maßnahmen begegnet, die sich auf die Zusammensetzung des Mörtels auswirkten.

Als wesentliche Maßnahme zur Schwindverringerung wurde zu einem HGZ-ähnlichem Bindemittelsystem übergegangen, das aber an Stelle des Portlandzementes mit Quellzement hergestellt wurde /10/. Das Quellen setzt während des Abbindeprozesses, im noch nicht erstarrten Mörtel ein. Dazu wurden zwei verschiedene Quellzementtypen verwendet: zum einen ein normaler Quellzement des Typs K (HGQ) und zum anderen ein Gießereibinder (HGJ), der weniger stark quellende Komponenten enthält. Die Quellkomponente des HGQ ist C_4A_3S , die des HGJ $C_{12}A_7$. Weiter wurde im Sinne der Schwindverringerung der Wasser-Bindemittel-Wert auf 0,35 gesenkt, gleichzeitig aber Verflüssiger eingesetzt, um die Verarbeitbarkeit noch zu gewährleisten. Methylcellulose wurde ebenfalls zur Reduzierung des Schwindens eingesetzt.

Zur Verbesserung der Haftung des Mörtels am Stein wurde die Benutzung eines Haftvermittlers - Mowilith - unumgänglich. Der Harzer Dolomit, zum Beispiel, ist ein sehr dichtes Gestein und bietet dem Mörtel somit wenig Möglichkeiten zur mechanischen Verzahnung als Unterstützung der Haftung.

Die Feuchtegradienten, die sich in Abhängigkeit von der Fugentiefe bildeten, riefen Zwangsspannungen im Mörtel hervor. Dadurch kam es zu Flankenansrissen, die sich bis zu einem völligen Abriß ausbreiteten. Zur Wahrung des guten Verbundes zwischen Fugenstopfmörtel und Stein wurde deshalb ein Deckmörtel erforderlich. Dieser Deckmörtel wird in die äußeren 2 cm der Fuge eingebracht und übernimmt im wesentlichen die Abdichtung der Fuge nach außen. Die tragende Funktion übernimmt der Fasermörtel in den tieferen Bereichen der Fuge.

Die Untersuchungen mit den modifizierten Mörteln erfolgten zunächst an Zwei-Stein-Körpern, da die optimale Menge der jeweiligen Zusätze noch erprobt werden mußte. Der Erfolg der Modifizierung wurde anhand der Haftzugfestigkeit und anhand des Bruchbildes bewertet. In der folgenden Tabelle 1.1 sind die Haftzugfestigkeiten der ursprünglichen Fasermörtel den Haftzugfestigkeiten der modifizierten Fasermörtel am Harzer Dolomit gegenübergestellt:

Tab 1.1: Haftzugfestigkeitsvergleich (Harzer Dolomit)

Faserstopfmörtel	$\beta_{\text{HZ}, 28\text{d}}$ original [N/mm ²]	$\beta_{\text{HZ}, 28\text{d}}$ modifiziert [N/mm ²]
HGZ	0,40	0,52
HGJ	0,30	1,18
HGQ	0,27	0,77

Wie man an den Ergebnissen erkennen kann, war die Modifizierung besonders für die Mörtel HGJ und HGQ erfolgreich. Die Modifizierung des HGZ erbrachte keine verbesserte Haftung am Harzer Dolomit.

Das Bruchbild veränderte sich generell mit zunehmender Modifizierung vom Adhäsionsbruch in der Grenzfläche zwischen Mörtel und Harzer Dolomit zum teilweisen Kohäsionsbruch mit anteiligem

Bruchverlauf im Naturstein und selten im Mörtel. Ab einer Haftzugfestigkeit $\beta_{\text{HZ}} = 0,7 \text{ N/mm}^2$ kann zunehmend mit einem anteiligen Kohäsionsbruch im Harzer Dolomit gerechnet werden.

2 Ergebnisse

2.1 Eigenschaften der Natursteine

Die für die Verbundproblematik maßgebenden Natursteineigenschaften sind die hygrischen und die mechanischen. Die Prüfung von Porenstruktur, Wasseraufnahme, E-Modul, Biegezug- und Druckfestigkeit stellt somit den wichtigsten Teil der Natursteinuntersuchungen dar. Darüberhinaus wurden die wichtigsten chemisch-mineralogischen Eigenschaften kurz zusammengefaßt, da auch die Verträglichkeit zwischen Mörtel und Naturstein gesichert sein muß.

Es muß vorangestellt werden, daß Natursteine durch ihre Entstehung in den Eigenschaftswerten oft stark schwanken und daß es am sinnvollsten ist, die Schwankungsbreite z.B. der Druckfestigkeit anzugeben. Ein Mittelwert birgt die Gefahr, daß die Schwankungen nicht genügend berücksichtigt werden.

2.1.1 Chemisch-Mineralogische Eigenschaften

Die mineralogische Zusammensetzung gibt Tabelle 2.1 wieder. Die Werte wurden zum Teil der Literatur /11-13/ entnommen, zum Teil

Tab. 2.1: Überblick über die Mineralogie der Natursteine

Natursteinart	Komponenten	Bindemittel	sichtbarer Porenraum (> 5 µm)
Harzer Dolomit	Gesamt: ca. 100 % davon: ca. 99 % Dolomit ca. 1 % Calcit	kaum vorhanden	kaum vorhanden
Sander Schilf-sandstein	Gesamt: ca. 78 % davon: 54 % Quarz 32 % Bruchstücke 7 % Plagioklas 3 % Feldspat	ca. 8 % tonig chloritische Kornhüllen, tlw. direkte chloritische Bindung	ca. 14 % meist 0,15 mm, Interpartikelporen, tlw. Auskleidung bzw. Füllung mit Chlorit
Rüthener Grün-sandstein	Gesamt: ca. 69 % davon: 77 % Quarz 13 % Glaukonit 6 % Bruchstücke 4 % Fe(OH) ₃	ca. 10 % barytisch-kieselig-tonig, Tonminerale tlw. als dünne Häutchen um Komponenten	ca. 21 % meist Interpartikel-, auch Intrapartikelporen, < 0,7 mm
Zwickauer Kohlesandstein	60-80 % Quarz 10-15 % Muskowit 5 % Plagiokl. 10-15 % Kaolinit	vorwiegend tonig-sericitisches Bindemittel als Porenzement, kieseliges Bindemittel untergeordnet	ca. 13,8 % Mittelwert: < 0,29 mm

an der MPA BS ermittelt (Harzer Dolomit). Die Werte stimmen mit den Literaturwerten überein. Die Zusammensetzung des Zwickauer Kohlesandsteins wurde vom Institut für Geotechnik der TU Dresden /14/ untersucht. Die Ergebnisse wurden freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Bei den untersuchten Gesteinen lassen sich in der mineralogischen Zusammensetzung Parallelen finden. Man hat es mit einem karbonatischem Gestein und drei verschiedenen Sandsteinen zu tun. Der Sander Sandstein ist vorwiegend tonig-chloritisch gebunden, der Rühener Grünsandstein weist eine barytisch-kieselig-tonige Mischbindung auf, und der Zwickauer Kohlesandstein besitzt eine hauptsächlich tonig-sericitische Bindung. Harzer Dolomit, Sander Schilfsandstein und Grünsandstein sind kaum bis undeutlich geschichtet, der Kohlesandstein ist durch die kohligen Lagen hingegen deutlich geschichtet. Beim zuletzt genannten Stein werden sich also Richtungsabhängigkeiten bemerkbar machen. Im sichtbaren Porenraum ähneln sich Sander Schilfsandstein und Zwickauer Kohlesandstein mit jeweils ca. 14 %, der Porenraum des Grünsandsteins liegt mit 21 % deutlich darüber und der Harzer Dolomit bildet das Extrem mit kaum sichtbaren Poren.

Der Vollständigkeit halber ist der geologische Überblick über die Natursteine - Abbauort, Alter, megaskopischer Überblick und Diagenese - im Anhang in der Tabelle A-3 beigelegt.

2.1.2 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften geben für die Verbundproblematik Stein-Mörtel die wichtigsten Erkenntnisse.

Reindichte/Rohdichte, Porosität, Wasseraufnahme

Die Reindichte wurde nach der Pyknometer-Methode ermittelt, die Porosität mit dem Hg-Druckporosimeter und die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck nach DIN 52103 /15/. Die Eigenschaften des Zwickauer Kohlesandsteins wurden vom Institut für Geotechnik /14/ und vom Institut für Tragwerke und Baustoffe /16/ der TU

Dresden zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 2.2 festgehalten:

Tab. 2.2: Rein-/Rohdichte, Porosität und Wasseraufnahme der Natursteine

Natursteinart	Rohdichte [g/cm ³]	Reindichte [g/cm ³]	Porosität [Vol.-%]	Wasseraufnahme [Gew.-%]
Harzer Dolomit	2,74	2,85	3,85	1,07
Sander Schilfsandstein	2,13	2,66	20,1	6,45
Rüthener Grünsandstein	2,08	2,73	23,3	7,04
Zwickauer Kohlesandstein	2,17	2,71	14,0	6,27

Roh- und Reindichte des Harzer Dolomits liegen nur um eine Zehnerstelle auseinander, und auch Porosität und Wasseraufnahme sind sehr gering. Es handelt sich also um einen sehr dichten Stein, der eine schwache Kapillaraktivität besitzt, hier liefert aber die Porenradienverteilung bessere Auskünfte. Der Sander Schilfsandstein hat dagegen eine deutliche Porosität von 20,1 Vol.-%. Die Wasseraufnahme liegt bei 6,45 Gew.-%, dieser Stein wird also einen deutlichen Saugeffekt auf den frischen Mörtel ausüben. Beim Rüthener Grünsandstein müßte dieser Effekt noch ausgeprägter sein, da er eine höhere Porosität und eine größere Wasseraufnahme zeigt als der Schilfsandstein. Die Porosität des Zwickauer Kohlesandsteins liegt unter der der beiden zuletzt genannten Gesteine,

aber über der des Harzer Dolomits. Der Einfluß auf den Frischmörtel dürfte also gegeben sein.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Porengrößenverteilungen sowie die dazugehörigen Summenkurven der Natursteine:

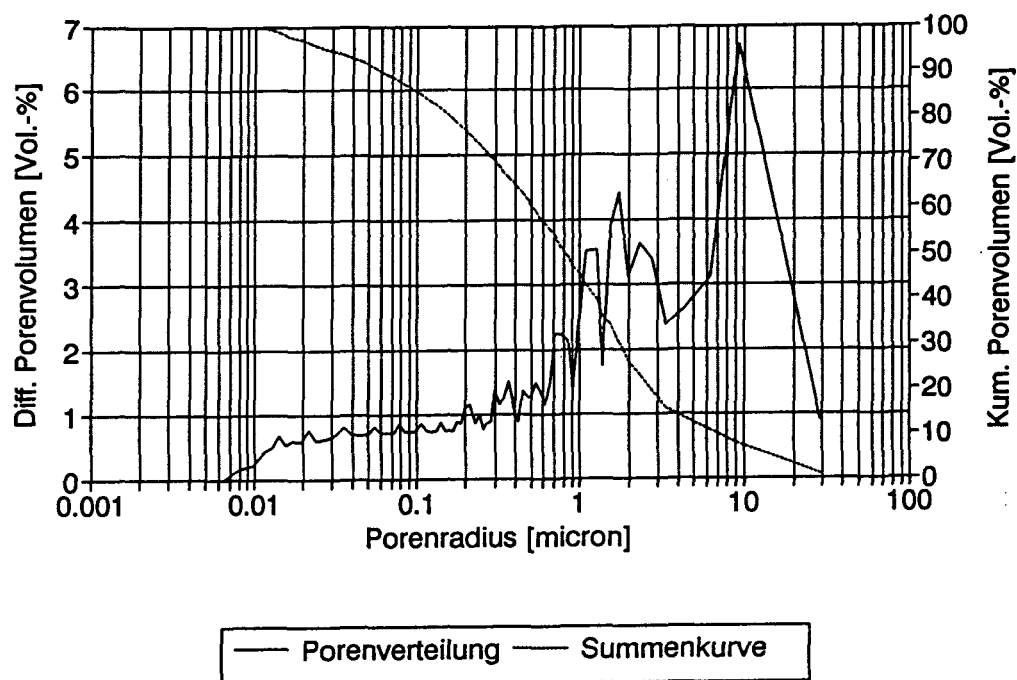


Abb. 2.1-a: Porenanalyse Harzer Dolomit Varietät 1

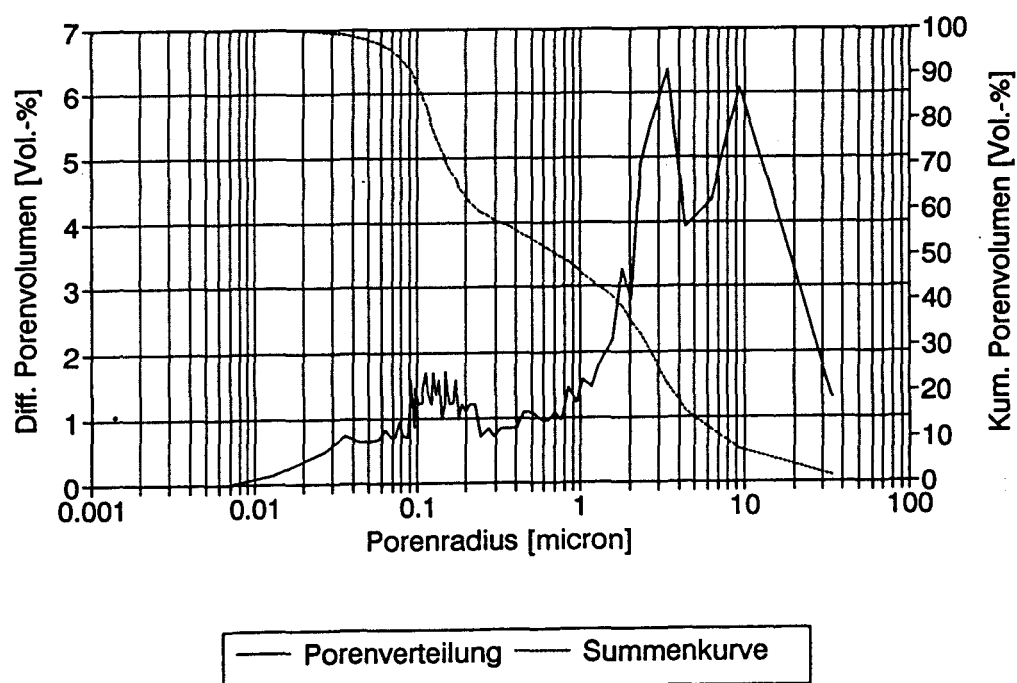


Abb. 2.1-b: Porenanalyse Harzer Dolomit Varietät 2

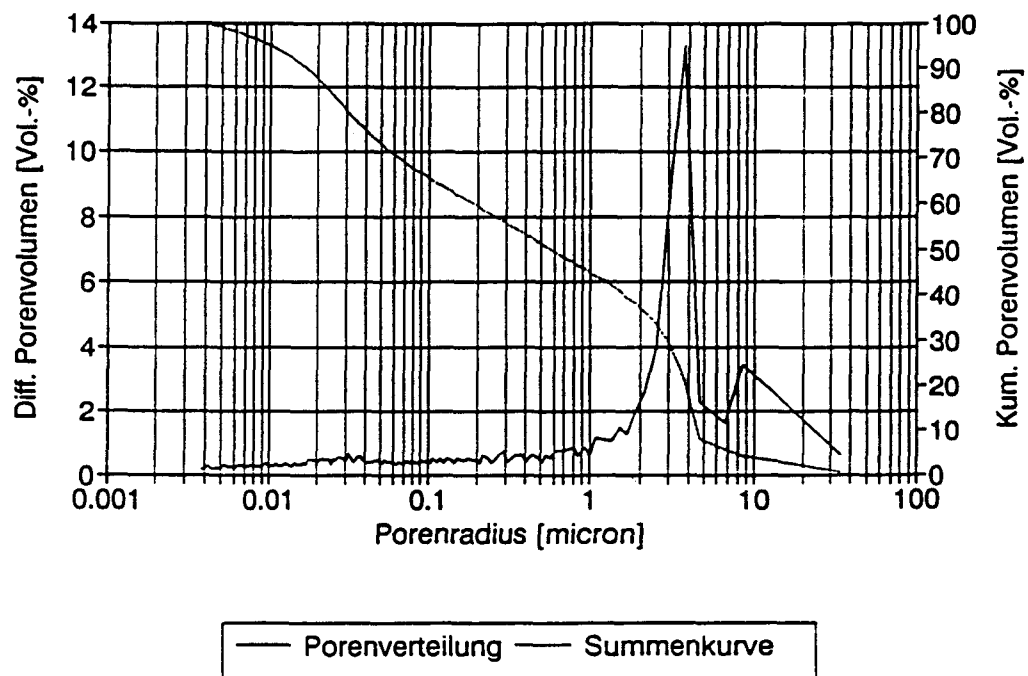


Abb. 2.2: Porenanalyse Sander Schilfsandstein

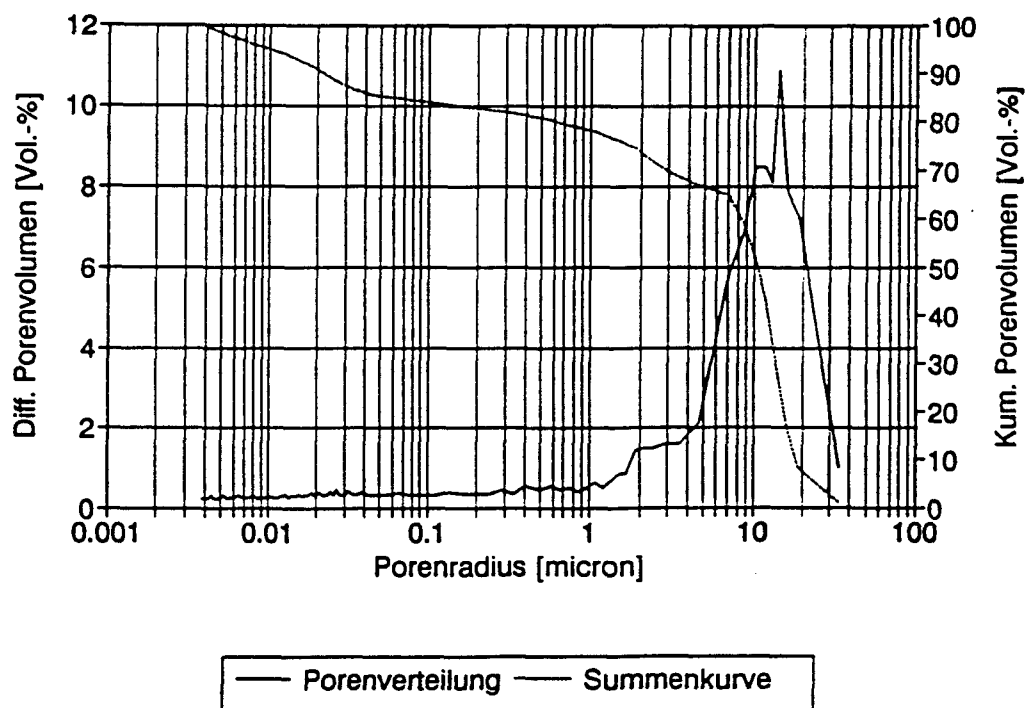


Abb. 2.3: Porenanalyse Rüthener Grünsandstein

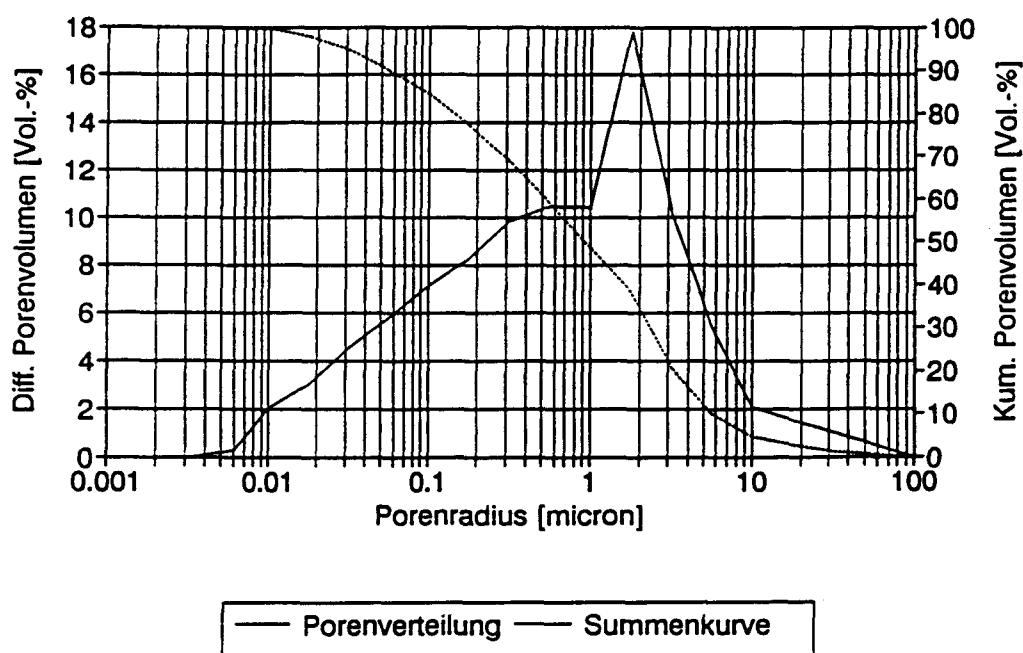


Abb. 2.4: Porenanalyse Zwickauer Kohlesandstein

Die Porenanalyse bestätigt die Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der Gesamtporosität. Die Porenverteilung des Harzer Dolomits hat ein schwaches Maximum bei $1,5\ \mu\text{m}$, die meisten Poren liegen noch darunter. Das deutliche Maximum des Sander Schilfsandsteins liegt bei $4,0\ \mu\text{m}$, das des Rüthener Grünsandsteins bei $10,5\ \mu\text{m}$. Bei dem zuletzt genannten Gestein liegen die meisten Poren in dem Bereich um $10,0\ \mu\text{m}$, ohne eine ausgeprägte Verteilung. Das Maximum des Zwickauer Kohlesandsteins liegt bei $2,0\ \mu\text{m}$. Zur Verdeutlichung der streuenden Eigenschaften der Natursteine wurden vom Harzer Dolomit zwei Porenanalysen beigelegt: die dichtere Varietät 2 des Dolomits zeigt bei $0,2\ \mu\text{m}$ ein zweites Maximum, es sind also mehr Poren im Feinstbereich anzutreffen.

Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, E-Modul

Die mechanischen Kennwerte der Natursteine wurden in Anlehnung an DIN 52105 /17/ und DIN 52112 /18/ ermittelt. Der dynamische E-Modul wurde durch die Schalllaufzeit bestimmt (Kennwerte des Zwickauer Kohlesandstein aus /16/). Tabelle 2.3 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen.

Tab. 2.3: Zug-/Druckfestigkeit und E-Modul der Natursteine

Natursteinart	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Dyn. E-Modul [N/mm ²]
Harzer Dolomit	3,5-30,0	89,9-167,0	21500 - 81500
Sander Schilfsandstein	3,0-18,0	49,1-67,9	16000 - 18600
Rüthener Grünsandstein	1,10-8,40	45,5-55,5	14400 - 16100
Zwickauer Kohlesandstein	S 0,3-0,4 P 0,7-1,3	S 15,4-28,4 P 14,9-28,5	S 8117-11000 P 12667-17000

S = Senkrecht zur Schichtung

P = Parallel zur Schichtung

Wenn keine Unterscheidung gemacht wurde, existiert keine ausgeprägte Schichtung

Die Zugfestigkeiten des Dolomits und des Schilfsandsteins liegen ungefähr im gleichen Bereich zwischen $\beta_z = 3,0$ bis $18,0$ bzw. bis $30,0$ N/mm². Der Grünsandstein hat eine geringere Zugfestigkeit und der Kohlesandstein eine bedeutend schwächere. Der Dolomit besitzt die höchste Druckfestigkeit und den höchsten E-Modul, gefolgt von Schilfsandstein, Grünsandstein und dem Kohlesandstein.

Die Ergebnisse lassen erwarten, daß die Verbundkörper mit Zwickauer Kohlesandstein im zentrischen Zugversuch am ehesten durch Adhäsionsbruch im Stein versagen, da dieser eine sehr niedrige Zugfestigkeit besitzt. Sander Schilfsandstein- und Grünsandstein - Verbundkörper werden voraussichtlich mit Adhäsionsbruch versagen. Der Harzer Dolomit besitzt eine so hohe Zugfestigkeit, daß der Mörtel eher durch Kohäsionsbruch versagen könnte als der Stein. Außerdem läßt der hohe E-Modul des Dolomits vermuten, daß thermisch und hygriisch induzierten Verformungen des Mörtels unter Bewitterung nur geringfügig nachgegeben wird. Das bedeutet einen erschwerten Haftverbund.

Diese Zusammenhänge sind abhängig von den Schwankungen in den Eigenschaften und stellen nur erwartete Tendenzen dar.

2.2 Mörtелеigenschaften

Zunächst wurden zwei Faserstopfmörtel, die vom WKI entwickelt worden sind /19-21/, und ein marktüblicher Sanierputz der Firma Remmers /22/ für das Drei-Stein-Körper-Programm in Walkenried, auf dem Freigelände der MPA und in der Klimakammer verwendet. In einem zweiten Versuchsabschnitt wurde ein dritter Faserstopfmörtel erprobt.

Alle Fasermörtel bestehen aus 85-90 % Hüttensand, einem 5-%igen Anteil von Anhydrit als Sulfatträger und einem 5- bis 10-%igen Zusatz einer spezifischen Komponente, die im einzelnen noch erläutert wird. Die Magerung erfolgt mit Ligno-Cellulose-Fasern, die aus Altpapier hergestellt werden. Die folgende Tabelle gibt den Anteil der verschiedenen Komponenten der Fasermörtel wieder:

Tab. 2.4: Bindemittelsysteme der Faserstopfmörtel

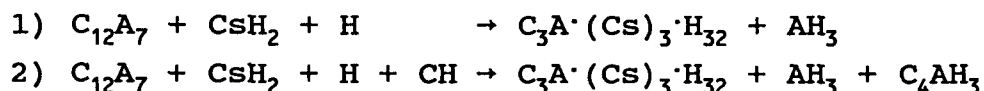
Binde- mittel	Hüttensand [Gew.-%]	Anhydrit [Gew.-%]	Zusatzkomponente [Gew.-%]
HGZ	85	10	5 PZ 45 F
HGQ	85	10	5 Quellzement
HGJ	90	5	5 Gießereibinder

Auf der Grundlage dieser Zusammensetzung werden die Mörtel mit Zusatzmitteln versehen, die z.B. die Verarbeitbarkeit oder den w/b-Wert beeinflussen.

Der HGZ enthält PZ 45 F als Zusatzkomponente, die für die erforderliche Festigkeit des Bindemittelsystems verantwortlich ist. Die Reaktionsfähigkeit des Hüttensandes, der im wesentlichen das Bindemittelsystem trägt, wird durch den Einsatz des Portlandzementes erhöht.

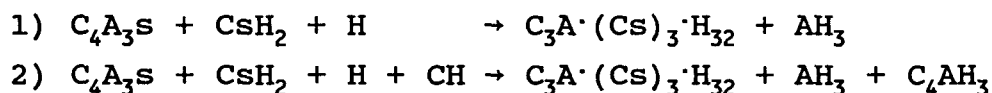
Die Zusatzkomponente des HGJ /10/ ist ein Gießereibinder mit sehr kurzer Erstarrungszeit und hoher Endfestigkeit. Er besitzt

quellfähige Bestandteile, die das Schwinden ausgleichen. Dieses Quellen wird durch einen 9- bis 10-%igen $C_{12}A_7$ -Anteil hervorgerufen und entspricht somit dem Typ M (Mikhailov) der Ettringitbildenden Quellzemente. Die möglichen Hydratationsgleichungen können folgendermaßen beschrieben werden /19/ (nicht stöchiometrisch):



Darüberhinaus wird dem HGJ zur Beschleunigung der Hüttensand-Reaktivität 2 % Calciumformiat zugesetzt.

Auch der HGQ enthält einen Ettringit bildenden Quellzementzusatz. Die quellfähige Zementphase ist hier das C_4A_3S . Dieser Quellzementtyp wird nach Klein Typ K genannt. Folgende Hydratationsgleichungen können dazu aufgestellt werden /19/:



Die Hydratation verläuft mit einer vergleichsweise gleichmäßigen Reaktionsrate, so daß das gesamte C_4A_3S in Ettringit umgewandelt wird.

Bei dem Sanierputz handelt es sich nach Herstellerangaben um einen gipsverträglichen Mörtel, der sowohl für Putz- als auch für Fugarbeiten historischer Bauten geeignet ist. Bekannt ist, daß dieser Mörtel mit Styroporkugeln und Bimsstein gemagert ist. Weiteres zur Zusammensetzung ist den Berichterstattern nicht bekannt.

2.2.1 Chemisch-mineralogische Eigenschaften

Chemische Analyse

Alle Bindemittel und der Sanierputz wurden einer naßchemischen Analyse unterzogen. Zuvor wurde der Sanierputz einer Abtrennung

der Styroporkugeln unterzogen, um auch hier eine Aussage über die Zusammensetzung des Bindemittels zu erreichen. Die oxidische Zusammensetzung ist den Tabellen A-2 bis A-5 im Anhang zu entnehmen. HGJ und HGQ sind sich in der Zusammensetzung weitgehend ähnlich: beide enthalten ca. 31 - 33 Gew.-% SiO_2 , ca. 42 Gew.-% CaO , ca. 10 Gew.-% Al_2O_3 und auch der Anteil an Alkalien (Na_2O und K_2O) von in der Summe 0,9 Gew.-% liegt im gleichen Bereich. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich in bezug auf ihren Sulfatgehalt: HGJ enthält ca. 3,5 Gew.-% und der HGZ ca. 6,0 Gew.-% SO_3 .

Das Bindemittel des Sanierputzes zeigt einen sehr hohen Gehalt an Salzsäureunlöslichem, d.h. organische Zusätze. Geht man davon aus, daß die Abtrennung der Styroporkugeln vollständig war und daß der Rest Bindemittel ist, so fällt der hohe Al_2O_3 -Gehalt von ca. 15,0 Gew.-% und der niedrige SO_3 -Gehalt von ca. 1,1 Gew.-% auf.

Röntgenbeugung

Zur weiteren Klassifizierung wurde die Röntgenbeugung herangezogen. HGZ, HGQ und HGJ enthalten zwar zu 85 bzw. 90 % die röntgenamorphe Phase Hüttensand, sollten aber trotzdem - aufgrund der unterschiedlichen Zusatzkomponenten - ein charakteristisches Beugungsdiagramm ergeben.

Die kristallinen Bestandteile des HGZ bestehen im wesentlichen aus Anhydrit, Gips, C_3S und $\beta\text{-C}_2\text{S}$, HGJ enthält mehr Anhydrit und Gips und als Klinkerphase nur C_3S , kein C_2S . Die quellfähigen Zementphasen konnten nicht nachgewiesen werden. Der Sanierputz besteht aus Calcit, Quarz, Gips und Anhydrit, Klinkerphasen wurden nicht gefunden.

2.2.2 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

Reindichte, Spez. Oberfläche, Korngrößenverteilung

Außerdem wurden die Reindichte, die Spezifische Oberfläche nach Blaine und die Korngrößenverteilung der Mörtel ermittelt. Die Reindichte wurde nach dem Pyknometer-Verfahren bestimmt, die spezifische Oberfläche mit der Durchströmzelle nach Blaine. Die folgende Tabelle 2.5 gibt diese Kennwerte der Mörtel wieder:

Tab. 2.5: Reindichte und spez. Oberfläche der Bindemittel

Binde- mittel	Reindichte [g/cm ³]	Spez. Oberfläche Blaine [cm ² /g]
HGZ	2,88	4000
HGQ	2,87	3760
HGJ	2,90	3760
Sanierputz	2,39	n.b.*

* = Die Bestimmung der Spezifischen Oberfläche nach Blaine erwies sich beim Sanierputz als nicht durchführbar, da das Material zu grob war

Die Reindichten aller Bindemittel liegen um 2,9 cm²/g, die des Sanierputzes um 2,4 cm²/g, also deutlich niedriger. Auch die Spezifischen Oberflächen von HGZ und HGJ sind mit 4000 bzw. 3760 cm²/g näherungsweise zu vergleichen.

Die Korngrößenverteilung wurde mittels der Siebanalyse bestimmt, die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle 2.6. Der Feinkornanteil der Fasermörtel scheint wesentlich höher zu sein als beim Sanierputz. Dazu muß gesagt werden, daß es sich bei den beiden Fraktionen 0,5 bis 1,0 und 1,0 bis 2,0 um die Styropor- und Sandmagerung des Fertigputzes handelt. Eine Abtrennung der Magerung war für eine für die Siebanalyse brauchbare Menge jedoch nicht durchführbar.

Tab. 2.6: Korngrößenverteilung der Mörtel

Kornklasse [mm]	HGZ [Gew.-%]	HGQ [Gew.-%]	HGJ [Gew.-%]	Remmers Sanierputz [Gew.-%]
0,000-0,032	93,5	90,5	93,5	Kornklasse 0,000-0,500 70,0
0,032-0,040	3,0	4,5	3,0	
0,040-0,063	2,5	1,5	2,0	
0,063-0,090	0,0	1,5	1,0	
0,090-0,125	1,0	1,0	0,5	
0,125-0,250	—	1,0	—	
0,250-0,500	—	—	—	
0,500-1,000	—	—	—	23,0
1,000-2,000	—	—	—	7,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0

Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte

Die Festigkeiten und die Rohdichten der fasergemagerten Mörtel wurden in Anlehnung an DIN EN 196 /23/ ermittelt. Der Dynamische E-Modul wurde nach dem Verfahren der longitudinalen Schallwelle geprüft. In der folgenden Tabelle 2.7 wurden die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammen mit den Ergebnissen von Normsandgemagerten Mörteln /19-21/ dargestellt. Der Sanierputz wurde nach Herstellerangaben verarbeitet und anschließend normgemäß geprüft.

Tab 2.7: Biegezug-/Druckfestigkeit nach 28 Tagen sowie Rohdichte der sand- bzw. fasergemagerten Mörtel

Mörtel	LC-Faser-Magerung				Normsand-Magerung		
	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [g/cm ³]	Dyn. E-Modul [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [g/cm ³]
HGZ	3,57	39,90	1,69	15364	5,03	44,30	1,95
HGQ	3,32	47,70	1,78	16347	7,92	43,75	1,98
HGJ	3,36	46,79	1,82	14920	10,34	45,69	2,00
Sanierputz	--	--	--	2730	1,58	4,07	0,745

Die Fasermagerung bewirkt eine geringere Rohdichte und daher auch einen niedrigeren E-Modul, auch wenn die Werte der sandgemagerten Mörtel nicht bekannt sind. Der E-Modul des Sanierputzes ist durch die Styroporkugeln besonders niedrig. Je niedriger der E-Modul, umso eher können Verformungen vom Material ertragen werden. Das bedeutet aber auch, daß die Festigkeiten sinken. Die Druckfestigkeit des Sanierputzes mit $\beta_0 = 4,07 \text{ N/mm}^2$ ist sogar bedenklich niedrig für einen Fugenmörtel. Als ein solcher wird er hier eingesetzt, der Hersteller empfiehlt ihn jedoch als Verfugmörtel. Auch anhand der geringen Biegezugfestigkeit kann man bei diesem Mörtel erwarten, daß er im Verbundkörper wohl eher versagen wird als der Naturstein, mit Ausnahme des Kohlesandsteins, der eine noch niedrigere Zugfestigkeit aufweist. Die Druckfestigkeiten der Faserstopfmörtel liegen im guten Bereich.

2.3 Verbunduntersuchungen

2.3.1 Versuchsprogramm

Mit allen vorgestellten Natursteinen und Mörteln wurden Untersuchungen an bewitterten Drei-Stein-Körpern durchgeführt. Ein vollständiges Raster durch die Kombination jedes Mörtels mit jedem Naturstein konnte jedoch wegen des erheblichen Arbeitsumfanges nicht realisiert werden. Die folgende Tabelle 2.8 zeigt das gesamte Versuchsprogramm:

Tab. 2.8: Versuchsprogramm Drei-Stein-Körper

Naturstein	Mörtel	Prüfkörper	Bewitterungsart
Harzer Dolomit	HGZ	D1, D2	Klimakammer
	HGJ	D3, D4	
	Sanierputz	D5, D6	
	HGZ	D7, D8	Freibewitterung Braunschweig
	HGJ	D9, D10	
	Sanierputz	D11, D12	
	HGZ	D13, D14	Freibewitterung Südharz
	HGJ	D15, D16	
	Sanierputz	D17, D18	
Sander Schilfsandstein	HGZ	S1, S2	Klimakammer
	HGJ	S3, S4	
Rüthener Grünsandstein	HGZ	G1, G2	Klimakammer
	HGJ	G3, G4	
Zwickauer Kohlesandstein	HGZ	K1, K2	Klimakammer

Alle Kombinationsmöglichkeiten wurden beim Harzer Dolomit unter jeglicher Bewitterungsart durchgeführt. Der Sanierputz wurde nur beim Dolomit erprobt, da er nach Herstellerangaben als Verfugmörtel und nicht für tiefgreifende Verfugungen entwickelt wurde. Aus diesem Grund wurde er bei späteren Drei-Stein-Körper-Untersuchungen mit Harzer Dolomit und den modifizierten Faserstopfmörteln als Fugendeckmörtel eingesetzt.

2.3.2 Ergebnisse mit Harzer Dolomit

Bei allen Dolomit-Mörtel-Kombinationen (Anhang A-4 bis A-17) stellte sich hinsichtlich der Verformungen des Steins das gleiche Bild ein: der Dolomit reagiert nur sehr schwach auf wechselnde klimatische Bedingungen. Nur bei großen Unterschieden in der Luftfeuchtigkeit - besonders bei den Versuchen in der Klimakammer - konnten geringe Dehnungen bzw. Stauchungen an den Meßstrecken in der Größenordnung von $\varepsilon = 0,5$ bis $1,0 \%$ gemessen werden.

Allgemein lassen die Rißanalysen und die damit in Zusammenhang stehenden Verformungsmessungen an den horizontalen und den vertikalen Meßstrecken der Fuge erkennen, daß die Haftung zwischen den nicht modifizierten Faserstopfmörteln und Dolomit sehr schlecht ist. An allen Prüfkörpern (D1 bis D4, D7 bis D10) bildeten sich im Laufe des Bewitterungszeitraums Flankenrisse, die sich meist bis über die gesamte Fugenlänge ausbreiteten. Das bedeutet, daß der Faserstopfmörtel unter Zwangsspannung stand. Zwangsspannungen treten auf, wenn der Mörtel an Verformungen normal zur Fugenflanke gehindert wird. Bei Verwendung des Sanierputzes (D5, D6, D11, D12) entstanden keine Flankenrisse.

Bei allen Prüfkörpern wurden Querrisse, die aufgrund von Eigenspannungen längs zur Fuge entstehen, beobachtet. Beim Sanierputz entstanden stets in größerem Abstand 3 bis 5 Querrisse pro Fuge. Das Gleiche konnte bei beiden Faserstopfmörteln in der Klimakammer beobachtet werden. Die unter Freibewitterung gelagerten Prüfkörper aus HGJ oder HGZ wiesen jedoch eine erheblich höhere Anzahl von bis zu 20 Rissen in kürzerem Abstand zueinander auf. Das hängt sicher mit der wesentlich komplexeren Witterungsbeanspruchung und dem längeren Bewitterungszeitraum zusammen. Es stellen sich andere Temperatur- und Feuchtegradienten längs der Fuge ein.

Prinzipiell verlaufen alle gemessenen Verformungen so, daß sie sich in eine Richtung verstärken. Ein Mörtel, der auf die erste

Klimabeanspruchung mit Dehnen reagiert, wird sich auch im Laufe der Beanspruchung noch weiter dehnen. Auch wenn zum Beispiel bei niedrigerer Luftfeuchtigkeit eine Verkürzung der Meßstrecke eintritt, wird die bei anschließend erhöhter Luftfeuchtigkeit eintretende Dehnung höher sein als die zuvor gemessene.

Die an den Fugen gemessenen Verformungen ϵ lagen bei den Faserstopfmörteln an den vertikalen Meßstrecken bei den Klimakammerversuchen im negativen Bereich zwischen 0,0 und - 30,0 ‰, auf dem Freigelände stets im positiven Bereich zwischen 0,0 und + 60,0 ‰. Die horizontalen Meßstrecken auf der Fuge wiesen in der Klimakammer + 20,0 bis - 90,0 ‰ auf, unter Freibewitterung zwischen 0,0 und + 60,0 ‰. Beim Sanierputz traten an der vertikalen und der horizontalen Meßstrecke in der Klimakammer 0,0 bis - 30,0 ‰ auf, unter Freibewitterung 0,0 bis + 30,0 ‰.

Die Klimakammeruntersuchungen wurden nach 16 bzw. nach 20 Wochen beendet. Die Freibewitterungsversuche dauerten wesentlich länger an: sie erstreckten sich auf 54 Wochen. Der Abbaetermin wurde so spät gewählt, weil mindestens eine komplette Bewitterungsperiode abgelaufen sein sollte. Eine weitere Auslagerung war nicht sinnvoll, da nach Beurteilung des Abriß- und Verformungsbildes feststand, daß sich der Haftverbund nicht mehr verbessern würde. Nach Abbau wurde die zentrische Haftzugfestigkeit ermittelt. An einigen Prüfkörpern, die zwar zunächst keine Haftzugfestigkeit aufwiesen, wurde an der intakten Mörtel-Stein-Kontaktfläche der Haftzugversuch nach DIN 18555 /9/ durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.8 zusammengestellt:

Tab. 2.8: Haftzugfestigkeit an Harzer Dolomit-Drei-Stein-Körpern

Mörtel	Bewitterungsart	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]
HGZ	Klimakammer	0,0
	Freibewitterung Braunschweig	0,1 1,5 DIN 18555
	Freibewitterung Südharz	0,0 0,1 - 1,5 DIN 18555
HGJ	Klimakammer	0,1 - 0,4
	Freibewitterung Braunschweig	0,01
	Freibewitterung Südharz	0,0 - 0,6
Sanierputz	Klimakammer	0,05
	Freibewitterung Braunschweig	0,0 - 0,1
	Freibewitterung Südharz	0,0 - 0,1

Die Ergebnisse zeigen eine ausgesprochen niedrige Haftzugfestigkeit zwischen allen verwendeten Mörteln und dem Dolomit. Die ermittelte Kraft wurde stets auf die gesamte Steinflanke bezogen. Als Anhaltswert ist für einen Fugenmörtel eine Haftzugfestigkeit β_{HZ} von mindestens 0,4 bis 0,6 N/mm² empfohlen. Lediglich beim HGJ konnten zum Teil brauchbare Werte erzielt werden.

Die Bruchbildanalyse ergab, daß in fast allen Fällen ausschließlich Adhäsionsbruch zwischen Mörtel und Stein auftrat. Das läßt den Schluß zu, daß es sich bei den ermittelten Zugfestigkeiten tatsächlich um die "wahre Haftzugfestigkeit" handelt. Bei teilweisem Kohäsionsbruch hätte man die Adhäsionsbruchfläche ausmessen müssen, um zur Haftzugfestigkeit zu gelangen.

Aus der Betrachtung einiger Dünnschliffe geht hervor, daß auch keine mikroskopisch kleinen Mörtelreste auf der Steinflanke haften. Die Flanke ist so dicht, daß eine Haftung extrem erschwert wurde.

Diese schlechten Ergebnisse aus den Dolomit-Verbundkörperuntersuchungen verlangten eine Modifizierung der Mörtel hinsichtlich Haftvermittlern und reduziertem Schwinden. Die Optimierungsschritte wurden im einzelnen bereits im Kapitel 1.6 beschrieben. Umgesetzt wurden sie an einer zweiten Drei-Stein-Körper-Serie, die der Freibewitterung im Südharz ausgesetzt wurde. Erste Zwischenergebnisse dieser Untersuchungen wurden in /24/ vorgestellt.

2.3.3 Ergebnisse mit Sander Schilfsandstein

Am Sander Schilfsandstein wurden die beiden Faserstopfmörtel, HGZ und HGJ, in der Klimakammer erprobt (Anhang A-18 bis A-21). Der Stein reagiert auf die Feuchtwechsel stärker als der Harzer Dolomit: die vertikalen Meßstrecken zeigten Verformungen von $\varepsilon = -5,0$ bis $-30,0$ ‰, die horizontale von $\varepsilon = +5,0$ bis $-20,0$ ‰.

In der Fuge bildeten sich bei allen Drei-Stein-Körpern 2 bis 5 Querrisse in einem größeren Abstand voneinander. Es handelt sich also um das gleiche Erscheinungsbild wie beim Dolomit. Es entstanden jedoch deutlich weniger Flankenrisse, die sich auch nicht über die ganze Fuge ausbreiteten, sondern sich auf einer Länge von 2 bis 6 cm bildeten. Dieses Bild deutet darauf hin, daß die auf den Mörtel ausgeübte Zwangsspannung nicht so hoch ist wie beim Harzer Dolomit. Der Schilfsandstein gibt dem Verformungsbestreben des Mörtels offensichtlich mehr nach. Die Eigenspannungen aufgrund der thermischen und hygrischen Gradienten wirken sich aber auch bei diesem Gestein durch Querrisse aus.

An den vertikalen und horizontalen Meßstrecken der Fuge wurden folgende Verformungswerte ermittelt: beim HGJ an der vertikalen Meßstrecke $\varepsilon = +30,0$ bis $-60,0$ ‰ und an der horizontalen $0,0$ bis $-90,0$ ‰. Die Verformungen des HGZ waren stärker. An der vertikalen Meßstrecke wurden $0,0$ bis $-180,0$ ‰ gemessen und horizontal auf der Fuge $+30,0$ bis $-120,0$ ‰. Dieses insgesamt starke Verkürzen der Meßstrecken hängt mit dem Wasseraufnahme-

vermögen des Schilfsandsteins zusammen. Seine kapillare Wasseraufnahme beträgt 6,45 Gew.-% im Vergleich dazu der Dolomit 1,07 Gew.-%. Durch diese Kapillaraktivität entzieht der Stein dem Mörtel Wasser und beeinflusst so dessen Porenstruktur. Dieser Vorgang kommt nicht zum Stillstand, sondern kann den Fugenmörtel noch nach Jahren belasten.

Die Drei-Stein-Körper wurden nach 20 Wochen abgebaut und auf ihre zentrische Haftzugfestigkeit geprüft. Tabelle 2.9 zeigt die Ergebnisse.

Tab. 2.9: Haftzugfestigkeit an Sander Schilfsandstein
-Drei-Stein-Körpern

Mörtel	Bewitterungsart	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]
HGZ	Klimakammer	0,1 - 0,15
HGJ	Klimakammer	0,0 - 0,05

Die Haftzugfestigkeit zwischen Sander Schilfsandstein und den beiden Faserstopfmörteln ist sehr niedrig. Die Betrachtung des Bruchbildes zeigt, daß außer Adhäsionsbruch zwischen Stein und Mörtel bei den Körpern mit HGZ auch Kohäsionsbruch im Mörtel aufgetreten ist. Beim HGJ ist das nicht der Fall. Bei Verwendung von HGZ ist offensichtlich ein Kontakt zwischen Stein und Mörtel eingetreten, der besser als die Zugfestigkeit des Mörtels ist. Diese wurde das kapillare Saugen des Steines beeinflusst, das die Struktur geschwächt hatte. Die Erklärung dafür, daß das beim HGJ nicht eingetreten ist, könnte darin liegen, daß es sich um eine andere, weniger stark saugende Varietät des Schilfsandsteins handelte. Es könnte aber auch sein, daß das Quellen des HGJ für ein Ablösen des Mörtels von der Steinflanke sorgte. Das würde bedeuten, daß große Zwangsspannungen auftraten.

Am Dünnschliff wird dieser schlechte Kontakt bestätigt. Eine dünne Schicht Mörtel ist nur bei den Prüfkörpern mit HGZ auf der Steinflanke haften geblieben.

2.3.4 Ergebnisse mit Rüthener Grünsandstein

Am Rüthener Grünsandstein wurden ebenfalls beide Faserstopfmörtel in der Klimakammer erprobt. Die Meßprotokolle sind im Anhang A-22 bis A-25 dargestellt. Der Stein reagierte deutlich auf die erhöhte Luftfeuchtigkeit jeweils mit Dehnung. Die gemessenen Verformungen liegen insgesamt zwischen $\epsilon = -20,0$ und $+30,0$ ‰.

Während der gesamten Bewitterungszeit bildete sich nur in einem Fall ein Flankenriss von ca. 3 cm Länge. Das spricht dafür, daß in diesen Drei-Stein-Körpern kaum Zwangsspannungen in der Fuge herrschten. Die Zahl der Querrisse ist aber recht hoch: an allen Fugen traten zwischen 3 und 10 Querrisse auf. Folglich müssen die Eigenspannungen höher gewesen sein.

Die Verformungen der Meßstrecken über die Fuge liegen bei den horizontalen Meßstrecken ähnlich wie beim Grünsandstein mit $\epsilon = -20,0$ bis $+10,0$ ‰. Diese "Synchronität" deutet auf eine gute Haftung hin. Alle vertikalen Meßstrecken über die Fuge verformten sich sehr stark mit Werten von $\epsilon = 0,0$ bis $-110,0$ ‰.

Die Prüfung der Haftzugfestigkeit ergab folgende Werte (Tabelle 2.10):

Tab. 2.10: Haftzugfestigkeit an Rüthener Grünsandstein
-Drei-Stein-Körpern

Mörtel	Bewitterungsart	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]
HGZ	Klimakammer	0,4 - 1,2
HGJ	Klimakammer	1,1 - 1,4

Diese Werte sind sehr hoch und stellen hinsichtlich der erwarteten Haftzugfestigkeit für einen Fugenmörtel zufrieden. Das Bruchbild gibt weiteren Aufschluß: die Prüfkörper mit HGZ versagten durch ca. 50 % Kohäsionsbruch im Stein und 50 % Adhäsionsbruch. Beim HGJ trat ausschließlich Kohäsionsbruch im Stein auf. Die Haftung ist so gut, daß die Zugfestigkeit des Steins erreicht wird.

Die Dünnschliffe lassen die gute Verzahnung zwischen Steinflanke und Mörtel erkennen. Diese Verzahnung ist mit der groben Struktur des Grünsandsteins zu erklären, die einen sichtbaren Porenraum ($> 5 \mu\text{m}$) von 21 % aufweist.

2.3.5 Ergebnisse mit Zwickauer Kohlesandstein

Drei-Stein-Körper aus Zwickauer Kohlesandstein wurden nur mit HGZ-Faserstopfmörtel in der Klimakammer erprobt (Anlage A-26 bis A-27). Der Stein verformte sich unter den Feuchtwechsels nur wenig. Dabei waren die Werte an der horizontalen Meßstrecke sogar sehr gleichmäßig mit $\epsilon = 0,0$ bis $- 20,0 \%$. An der vertikalen Meßstrecke lagen die Verformungen zwischen $+ 30,0$ und $- 10,0 \%$.

Auch bei diesen Prüfkörpern traten nur an 2 Stellen ca. 2 cm lange Flankenrisse auf und pro Fuge 4 bis 5 Querrisse. Die an der Fuge gemessenen Verformungen schwankten an der horizontalen Meßstrecke zwischen $0,0$ und $- 60,0 \%$. An der vertikalen Meßstrecke war eine rasche Zunahme der Verkürzungen zu beobachten, so daß später zwischen $- 60,0$ und $- 150,0 \%$ gemessen wurde.

In allen Fällen war die Haftzugfestigkeit höher als die Zugfestigkeit von Mörtel oder Kohlesandstein. Tabelle 2.11 zeigt die Ergebnisse der zentrischen Zugprüfung:

Tab. 2.11: Haftzugfestigkeit an Zwickauer Kohlesandstein
-Drei-Stein-Körpern

Mörtel	Bewitterungsart	Haftzug- festigkeit β_{HZ} [N/mm ²]
HGZ	Klimakammer	0,1 - 0,3

Das Bruchbild setzte sich aus allen Brucharten zusammen. Dabei trat Adhäsionsbruch nur auf 10 % der Ausgangsfläche auf. Kohäsionsbruch im Stein überwog in 2 Fällen deutlich mit über 85 %. Das liegt an der geringen Zugfestigkeit des Kohlesandsteins, die senkrecht zur Schichtung, wie in diesem Fall nur $\beta_z = 0,3$ bis $0,4$ N/mm² erreicht. Darüberhinaus trat aber auch Kohäsionsbruch im Mörtel durch die gute Wasseraufnahme des Kohlesandsteins von 6,27 Gew.-% auf.

Am Dünnschliff des Kohlesandstein-HGZ-Verbundes kann die gute Verzahnung zwischen Stein und Mörtel erkannt werden.

3 Auswertung und weiteres Vorgehen

Die Untersuchungen an bewitterten Drei-Stein-Körpern zeigen, daß die Haftung zwischen Naturstein und Mörtel stark von der verwendeten Gesteinsart abhängt. Die Ergebnisse aus Verformungs- und Klimadaten, Rißanalyse, Prüfung der Haftzugfestigkeit sowie der mikroskopischen Untersuchungen der Kontaktzone belegen, daß verschiedene Probleme den Stein-Mörtel-Verbund beeinträchtigen können. Greifen mehrere Probleme ineinander, so ist praktisch keine Haftung möglich.

Das Problem des Wasserentziehens durch das kapillare Saugen des Steines macht sich besonders bei den Gesteinen mit höherer Porosität bemerkbar, zum Beispiel beim Sander Schilfsandstein oder beim Rüthener Grünsandstein. Je höher die Porosität und je höher der Anteil von Kapillarporen, desto höher ist das kapillare Saugen. Dem Mörtel wird im jungen Alter das zum Abbinden erforderliche Wasser entzogen. Dadurch kann er die erreichbare Festigkeit nicht erlangen.

Dieses ist beim Harzer Dolomit aufgrund seiner Dichtigkeit nicht zu erwarten. Hier ist die Struktur des Steins maßgeblich. Der Dolomit ist feinstrukturiert und hat auf seinen Schnittflächen keinerlei Unebenheiten. Dem Mörtel wird keine Möglichkeit zur mechanischen Verzahnung geboten. Beim Grünsandstein und beim Kohlesandstein wird dagegen durch die rauhen Steinflanken die Adhäsionsfläche erhöht, was mit einer verbesserten Haftung einhergeht. Der Problematik der schlechten Verzahnung könnte durch Aufrauung der Steinflanken begegnet werden. Dieses Aufrauen kann durch Wasserstrahl, der zum Fugenausräumen am Bauwerk verwendet wird und dabei die Steinflanken angreift, oder durch Sandstrahlen erreicht werden. Eine weitere Lösung wäre die Verwendung von Haftvermittlern.

Das chemische Schwinden des Mörtels spielt eine wichtige Rolle. Im Laufe des Schwindprozesses reißt der Mörtel an einer Steinflanke ab, so daß dieser Abriß einen idealen Angriffspunkt für

Feuchte und somit auch für organischen Befall bietet. Untersuchungen /7/ zeigten, daß die LC-Faser bei biogenem Befall nachträglich beeinträchtigt werden kann.

Unterschiedliche Reaktionen von Mörtel und Stein auf Temperatur- und Feuchteänderungen zerstören den Verbund. Das konnte insbesondere beim Dolomit beobachtet werden. Der hohe E-Modul des Steins steht in Diskrepanz zum niedrigeren E-Modul der verwendeten Mörtel. Risse lassen sich bei Ausbildung thermischer und hygrischer Gradienten über die Fugentiefe nicht vermeiden. Es treten Zwangsspannungen ein, die das Entstehen von Querrissen hervorrufen.

Um einen Verbund zwischen Fasermörtel und Harzer Dolomit zu erreichen, müssen eine Reihe von Maßnahmen ergriffen werden, die im Kapitel 1.6 erläutert wurden. Nach der erfolgreichen Erprobung der vorgenommenen Optimierungsmaßnahmen am einfachen Verbundkörper wurden weitere Drei-Stein-Körper - Untersuchungen mit den quellfähigen Fasermörteln HGJ und HGQ eingeleitet. So wurden im Oktober 1993 an der Südseite der St. Johannis Kirche in Ellrich Drei-Stein-Körper aus Harzer Dolomit und HGJ- bzw. HGQ-Fasermörtel hergestellt und nach 14tägiger Nachbehandlung der Witterung ausgesetzt. Nach einer nunmehr 12monatigen Auslagerungszeit kann man feststellen, daß der HGJ-Fugenstopfmörtel in Kombination mit einem Deckmörtel einen hervorragenden Verbund zum Harzer Dolomit aufweist. Es wurden bisher keinerlei Risse im Mörtel beobachtet, obwohl Dehnungen und Stauchungen des Mörtels in der Fuge in Abhängigkeiten von den klimatischen Bedingungen auftreten. Der HGQ-Fugenstopfmörtel ist in seinen Quelleigenschaften offensichtlich überdimensioniert für die Anwendung im Verfugbereich: es bildeten sich schon in den ersten Wochen nach Herstellung Querrisse und Flankenrisse, die sich teilweise bis zu einem völligen Abriß ausbreiteten.

Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse geben einen guten Überblick über die Zusammenhänge zwischen Naturstein-/Mörtel-eigenschaften und der Haftung zwischen Naturstein und Mörtel.

Der für das Pilotobjekt St. Johannis Kirche optimierte Fasermörtel wird momentan an einer Musterfläche der Kirche erprobt, um die Eignung zu verifizieren und um die Applikationstechnik am Bauwerk zu erproben. Diese Vorgehensweise der objektspezifischen Mörtelanpassung ist auch für das Pilotobjekt Runneburg in Weisseesee (Thüringen) vorgesehen. Derzeit befinden sich die Mörteluntersuchungen für den Travertinstein dieses Objektes in der Optimierungsphase. Eine entsprechende Berichterstattung wird erfolgen.

Der Verbund zwischen Stein und Mörtel ist neben der Verträglichkeit und der Beständigkeit ein Kriterium für die Dauerhaftigkeit der Verfugung. Das heißt, daß die Dauerhaftigkeit erschöpft ist, sobald der Verbund nicht mehr gegeben ist. Der Verbund ist abhängig von Zeit und Ort und den Temperatur- und Feuchtegradienten, die sich im Verbund einstellen können. Diese Problematik bedarf weiterer Untersuchungen mit dem Ziel, ein allgemeingültiges Rechenmodell zu erstellen. Die hier angewandte Versuchstechnik ist dafür aber zu aufwendig. Es ist vorgesehen, Temperatur- und Feuchtegradienten in Fuge und Stein zu ermitteln und bestimmte Klimadaten einzustellen, was sich am besten im Labor und in der Klimakammer realisieren läßt. Dabei sollten möglichst homogene Natursteine verwendet werden, um Schwankungen in den Natursteineigenschaften gering zu halten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können dann mit Wärme- und Feuchtetransportgesetzen zu einem allgemeingültigen Dauerhaftigkeitsmodell verknüpft werden.

Literatur

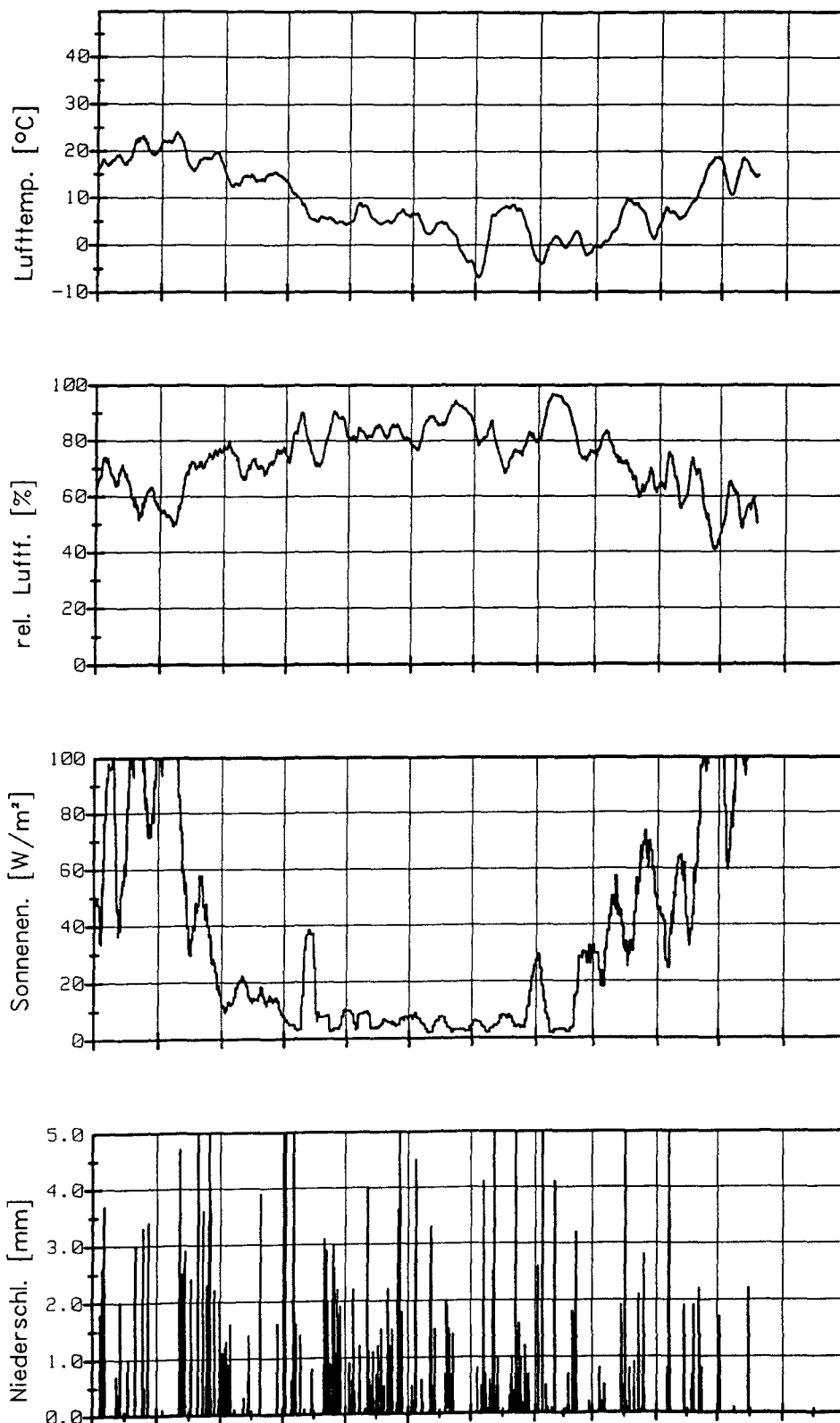
- /1/ Knöfel, D.; Schubert, P.: Handbuch Mörtel und Steingerüstungsmittel in der Denkmalpflege, Verlag Ernst & Sohn, 1993
- /2/ Sattler, H.: HGZ-Fasermörtel für die Fugensanierung - Anwendungsvorteile und -grenzen, Bauwirtschaftliche Informationen, November 1993
- /3/ Polster, H.; Hoffmann, D.: Untersuchungsbericht Nr. 06.93 zu Ergebnissen der Verträglichkeitsuntersuchungen an Hüttensand-Gips-Bindemittelsystemen, IEMB Berlin, Februar 1993
- /4/ Weiß, D.; Rostásy, F.S.: Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen HGZ-Faserstopfmörteln und Natursteinen, Forschungsbericht an der MPA Braunschweig, 1992
- /5/ Thole, V.: Faserstopfmörtel zur Bauwerkssanierung - Herstellung und Eigenschaften von Mörtel mit Cellulosefasern (Teil 1), In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Expert Verlag, 1993
- /6/ Sattler, H.: Eignung von Lignocellulosefasern als Asbestersatz; Bausanierung, Heft 3, 1993
- /7/ Warscheid, T.: Zwischenbericht zu den mikrobiologischen Untersuchungen an HGZ-Fasermörteln, unveröffentlicht, Labor Bode-Warscheid, 1994
- /8/ Budelmann, H.; Weiß, D.; Rostásy, F.S.: Der Verbund zwischen Fugemörtel und Naturstein - Anforderungen und Prüfung, In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Expert Verlag, 1993
- /9/ DIN 18555, Teil 6: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Festmörtel - Bestimmung der Haftzugfestigkeit, November 1987
- /10/ Erbaydar, S.: Faserstopfmörtel zur Bausanierung - Sulfatisch/basisch angeregte quellfähige Mörtelsysteme mit Cellulosefasern; In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Expert Verlag, 1993
- /11/ Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Karl M. Lipp Verlag, München 1990
- /12/ Müller, F.: Gesteinskunde, Erber Verlag, Ulm 1984
- /13/ Reinsch, D.: Natursteinkunde, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1991

- /14/ Kutschke, D.; Grunert, S.: Zwickauer Kohlesandstein, Zusammenstellung von Grunddaten (Kurzfassung), Institut für Geotechnik der TU Dresden, Februar 1994
- /15/ DIN 52103: Prüfung Von Naturstein und Gesteinskörnungen - Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert, Oktober 1988
- /16/ Menzel, U.: Gesteinstechnische Kennwerte des Zwickauer Kohlesandsteins, Untersuchungsbericht, Insitut für Tragwerke und Baustoffe der TU Dresden, Januar 1994
- /17/ DIN 52105: Prüfung von Naturstein - Druckversuch, August 1988
- /18/ DIN 52112: Prüfung von Naturstein - Biegeversuch, August 1988
- /19/ Erbaydar S.: Rezepturoptimierung und -modifizierung von "sulfatisch/basisch angeregten Bindemittelsystemen" mit und ohne Zusätzen, Teile 1 - 8, WKI-Berichte, 1992
- /20/ Erbaydar, S.: Hydratation des Hüttensandes im HGZ WKI-interner Bericht, Mai 1991
- /21/ Erbaydar, S.: Einfluß von abbindesteuernden Zusatzmitteln auf die HGZ-Hydratation sowie Untersuchungen über alternative Bindemittelsysteme auf der Basis von Hüttensand-Tonerdezement bzw. Hüttensand-Schnellzement WKI-interner Bericht, Februar 1992
- /22/ Prospekte und Sicherheitsdatenblatt der Firma Remmers 1994
- /23/ DIN EN 196, Teil 1: Prüfverfahren für Zement - Bestimmung der Festigkeit, März 1990
- /24/ Rinne, A.; Warnecke, P.; Rostásy, F.S.: Zur Dauerhaftigkeit von Verfugungen unter thermisch-hygrischer Einwirkung, In: Wiss. Zeitschrift der HAB Weimar, Heft 5/6/7/1994, anlässlich der 12. Int. Baustofftagung ibausil in Weimar, September 1994

Anhang

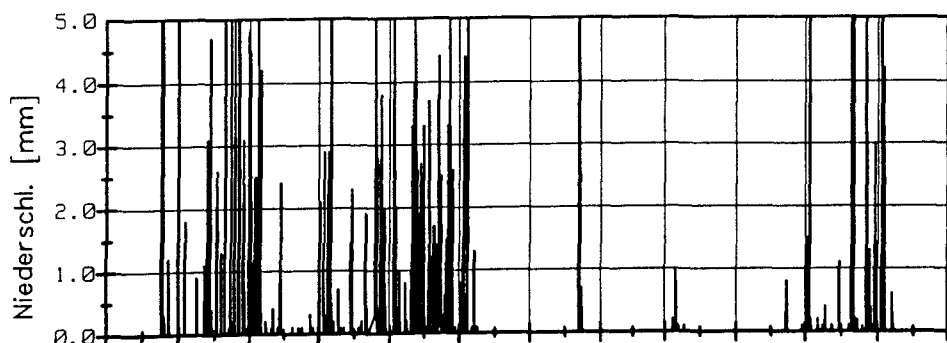
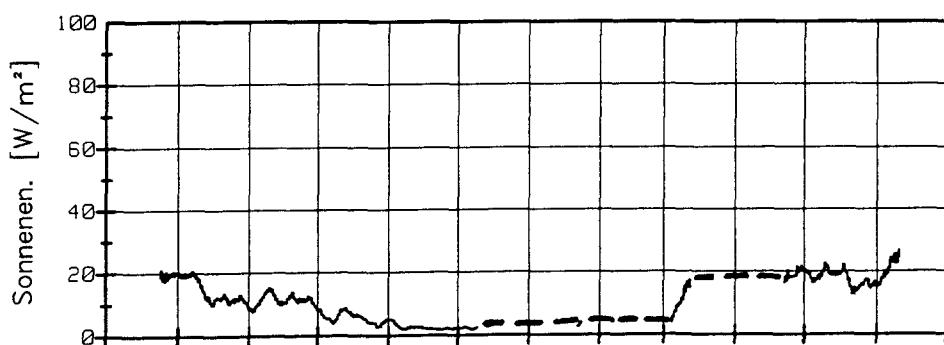
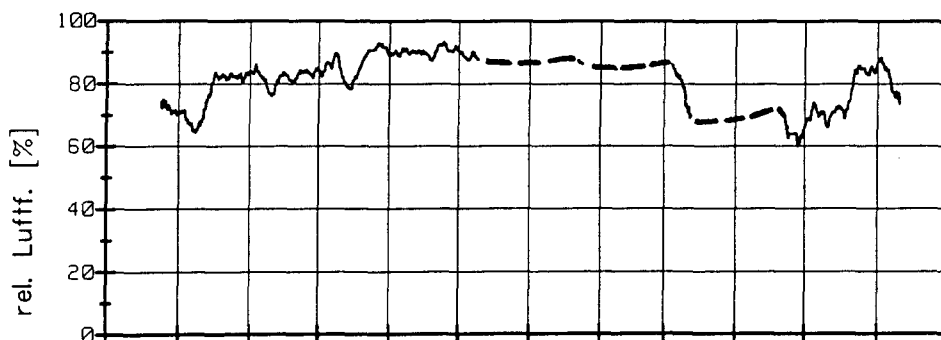
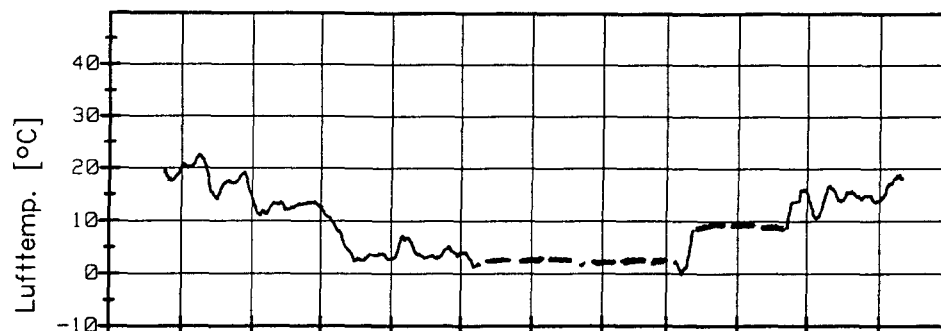
A-1: Klimadaten MPA Braunschweig

Die Klimadaten wurden im Zeitraum 01.07.92 bis 01.07.1993 ermittelt. Die Zeitachse erhielt eine monatliche Einteilung. Es handelt sich bei der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und der Sonnenenergie um geglättete Werte.



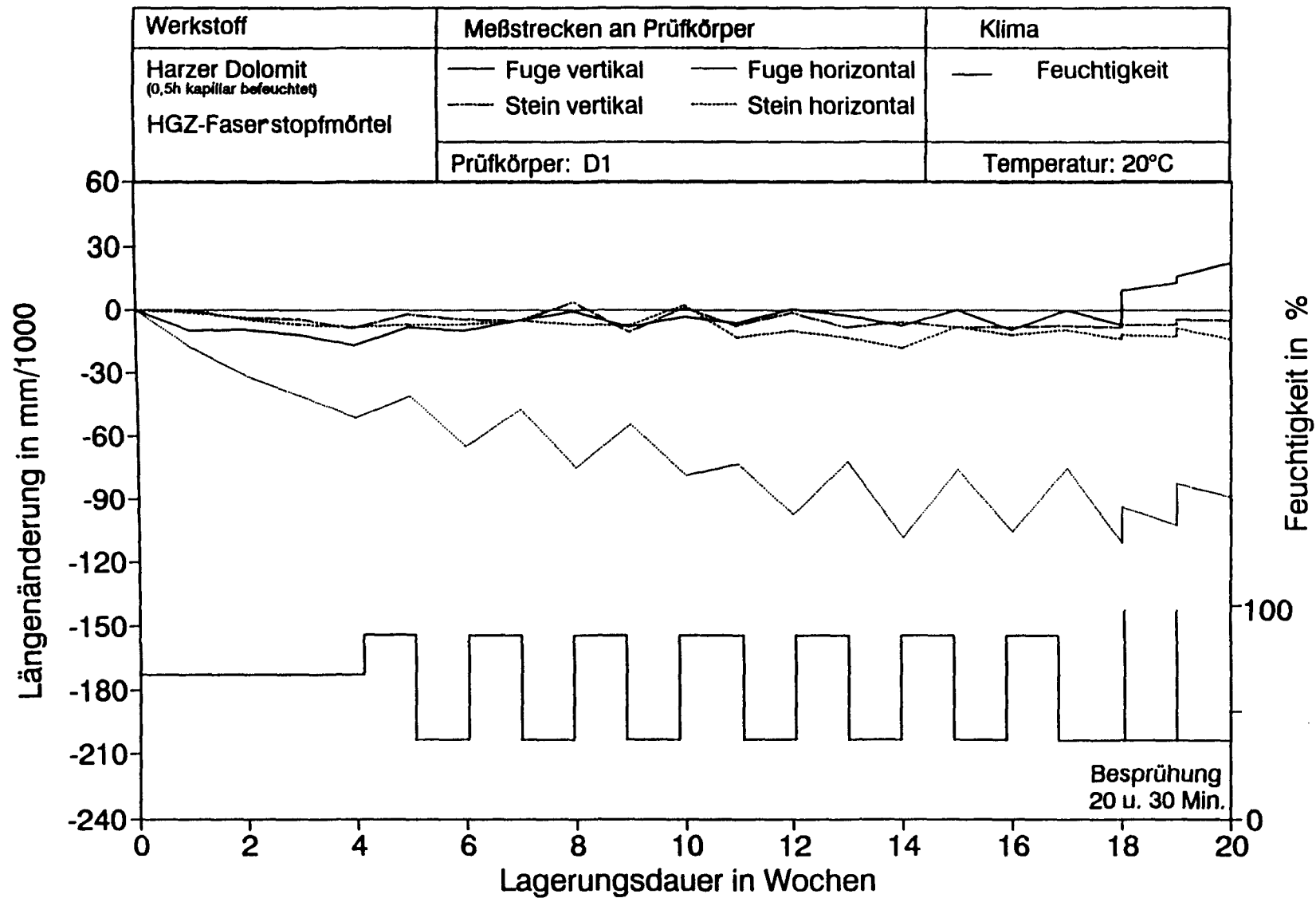
A-2: Klimadaten Südharz

Die Klimadaten wurden im Zeitraum 01.07.92 bis 01.07.1993 ermittelt. Die Zeitachse erhielt eine monatliche Einteilung. Es handelt sich bei der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und der Sonnenenergie um geglättete Werte. Die durch Stromausfall entstandenen Ausfallzeiten wurden in der Graphik durch einen gestrichelten Linienzug dargestellt.



A-3: Geologischer Überblick über die Natursteine

	Abbauort Alter	Megaskopischer Überblick	Diagenese
Harzer Dolomit	Steina bei Bad Sachsa Zechstein: Werra- und Staßfurt- Zyklus 230 Mio Jahre	braungrau, undeut- lich geschichtet, leicht bituminöser, dicht erscheinend	ursprünglich oolithischer Kalkstein, des- sen Feinstruktur durch frühdiagenetische Dolomi- tisierung verwischt wurde
Sander Schilf- sandstein	Sand am Main, Ober- franken Mittlerer Keuper 205 Mio Jahre	grau bis olivgrün, fein- bis mittelsandig, Schichtung kaum erkennbar	kieselige Kornkontakte bzw. über tonig-chloriti- sches Bindemittel, 60 % des Kornumfanges im Kon- takt, tlw. Chlorite in Zwickeln
Rüthener Grünsand- stein	Rüthen, Sauerland Oberkreide, unteres Cenoman 100 Mio Jahre	graugrün, mittel- sandig, fein- bis mit- telporig, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ - Minerale als kleine braune Körner	authigene Materialneu- und umbil- dungen, Drucklösungen
Zwickauer Kohlesand- stein	Zwickau, Erzgebirge Oberkarbon	heterogene Struktur mit kieselig-tonigem Bindemittel, kohlige Lagen	das Zwickauer Becken füllte sich mit flözführen- den Molasseablagerungen, diagenetische und regionalmetamorphosische Neu- und Umlagerungen von Quarz, Sericit, Kaolinit etc.



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

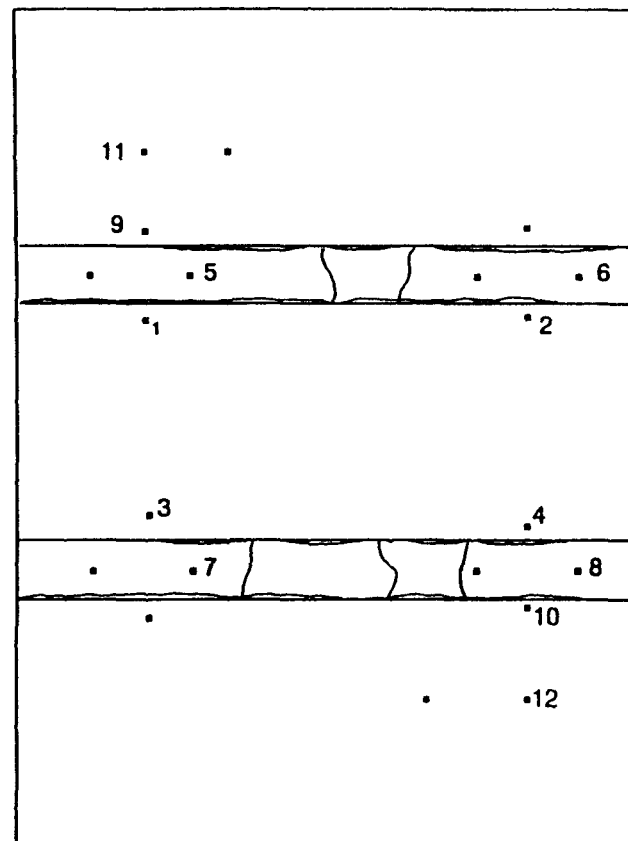
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit / HGZ

Herstellungsdatum: 6.04.92

Messkörper: D1

Klimakammer



A-4: D1 Harzer Dolomit - HGZ (Klimakammer)
A-4b: D1 RiSanalyse

3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 30.10.92

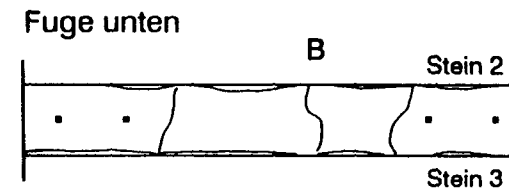
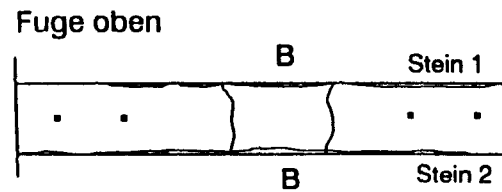
Aufnahmedatum: 8.02.93

Messkörper: D-1

Stein/Mörtel: Dolomit/HGZ

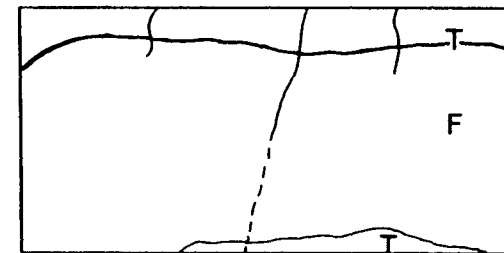
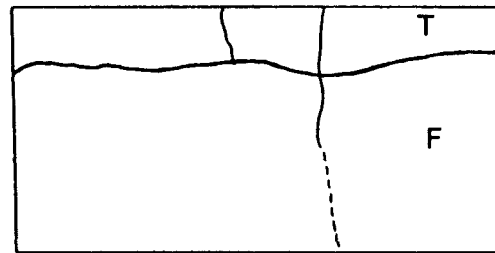
A-4: D1 Harzer Dolomit - HGZ (Klimakammer)
A-4c: D1 Bruchbildaufnahme

Ansicht:



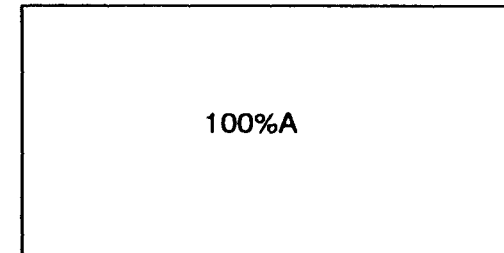
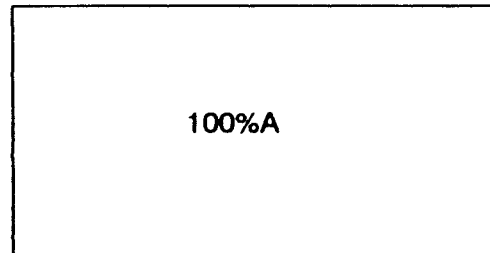
Aufsicht: Mörtel

"Trocken / Feucht"

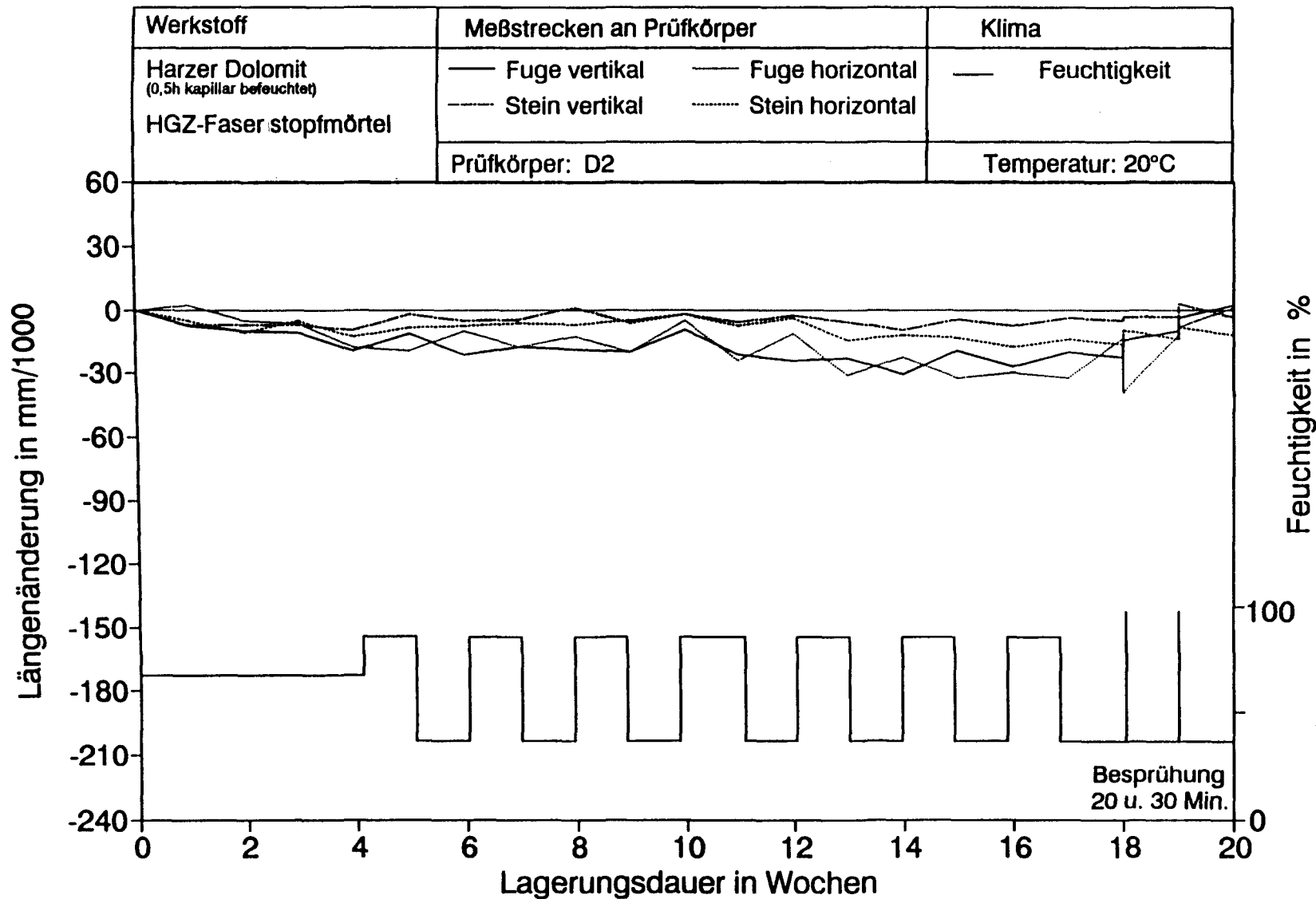


Aufsicht: Stein 2

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; K - Kohäsion; A - Adhäsion



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

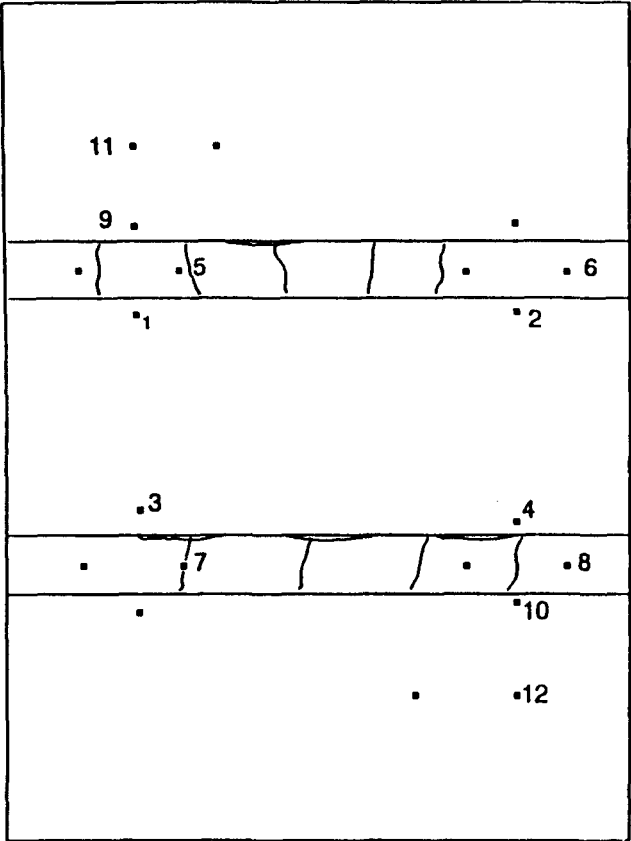
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit / HGZ

Herstellungsdatum: 6.04.92

Messkörper: D2

Klimakammer



A-5: D2 Harzer Dolomit - HGZ (Klimakammer)
A-5b: D2 Rißanalyse

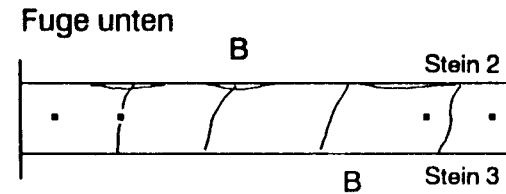
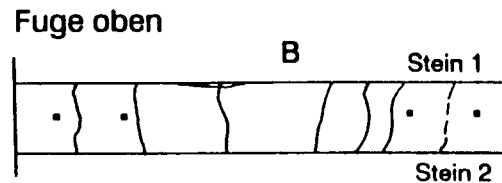
3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 20.11.92
Aufnahmedatum: 8.02.93

Messkörper: D-2

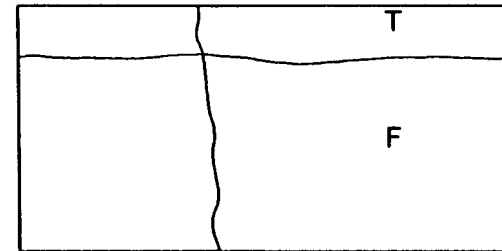
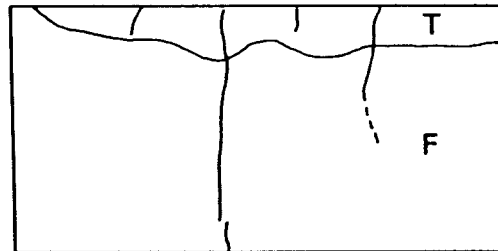
Stein/Mörtel: Dolomit/HGZ

Ansicht:



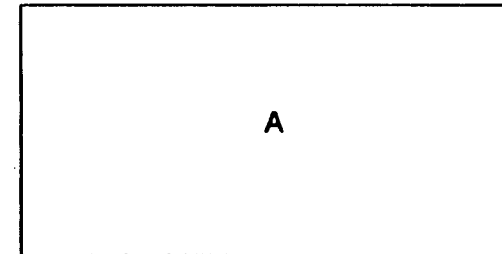
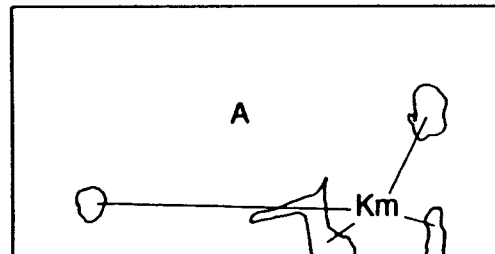
Aufsicht: Mörtel

"Trocken / Feucht"



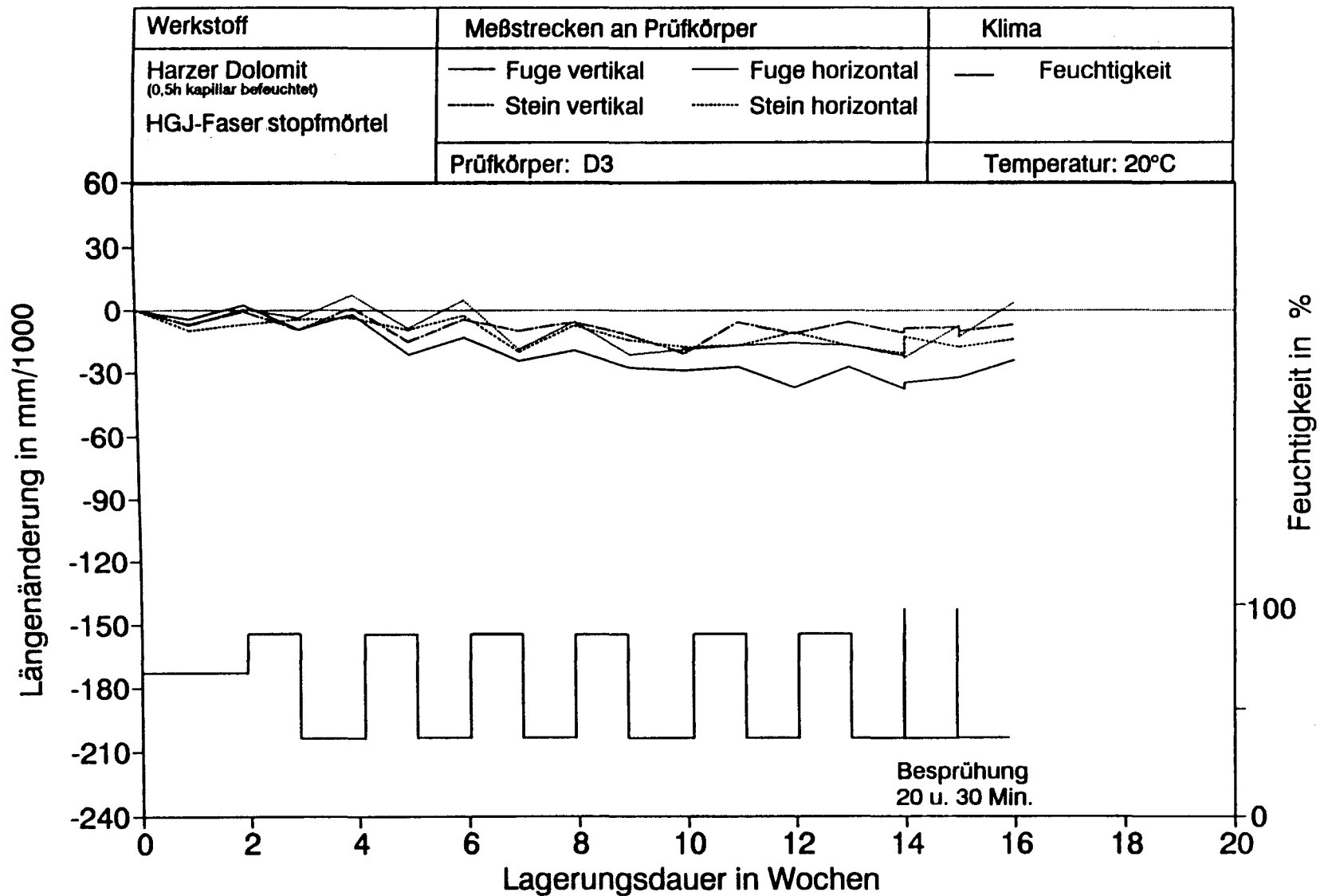
Aufsicht : Stein

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks - Kohäsionsbruch im Stein; Km - Kohäsionsbruch im Mörtel

A-5: D2 Harzer Dolomit - HGZ (Klimakammer)
A-5c: D2 Bruchbildaufnahme



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

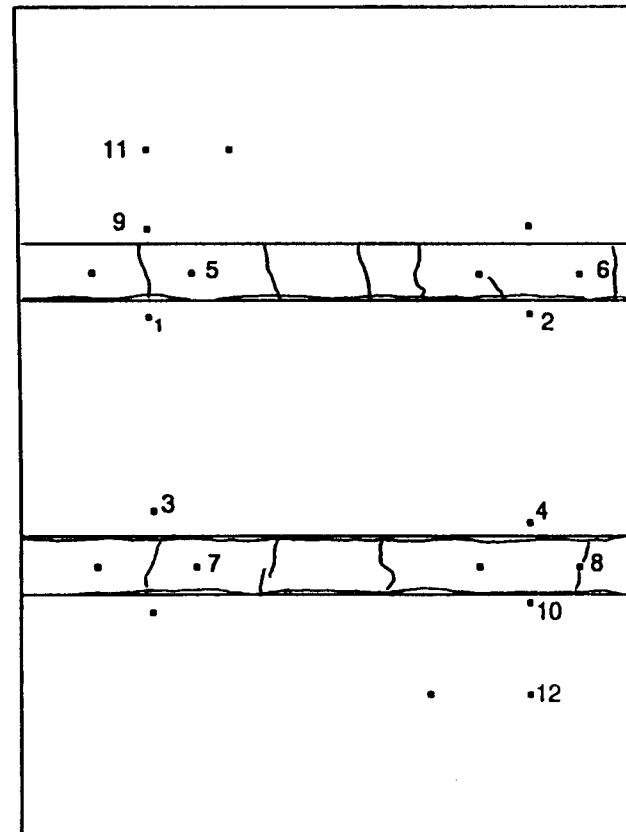
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit / HGJ

Herstellungsdatum: 5.05.92

Messkörper: D3

Klimakammer



A-6: D3 Harzer Dolomit - HGJ (Klimakammer)
A-6b: D3 Rißanalyse

3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 23/6.11.92

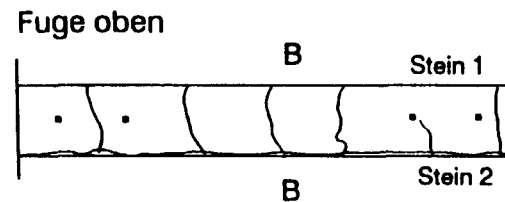
Aufnahmedatum: 9.02.93

Messkörper: D-3

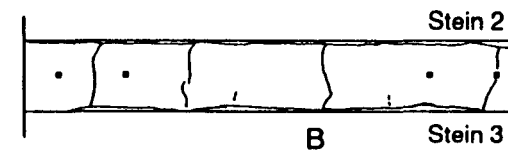
Stein/Mörtel: Dolomit/HGJ

A-6: D3 Harzer Dolomit - HGJ (Klimakammer)
A-6c: D3 Bruchbildaufnahme

Ansicht:

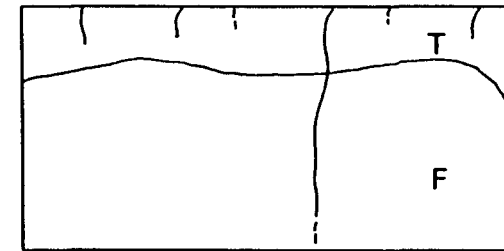
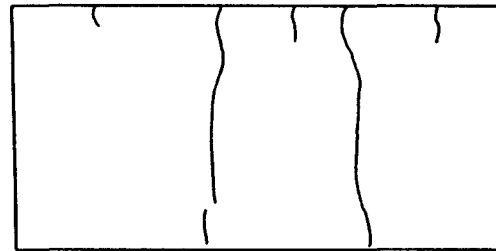


Fuge unten



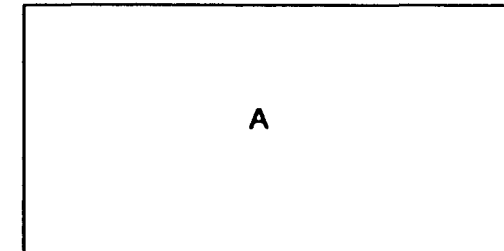
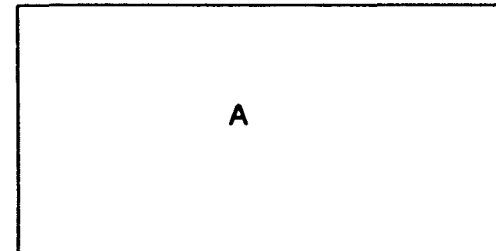
Aufsicht: Mörtel

"Trocken / Feucht"

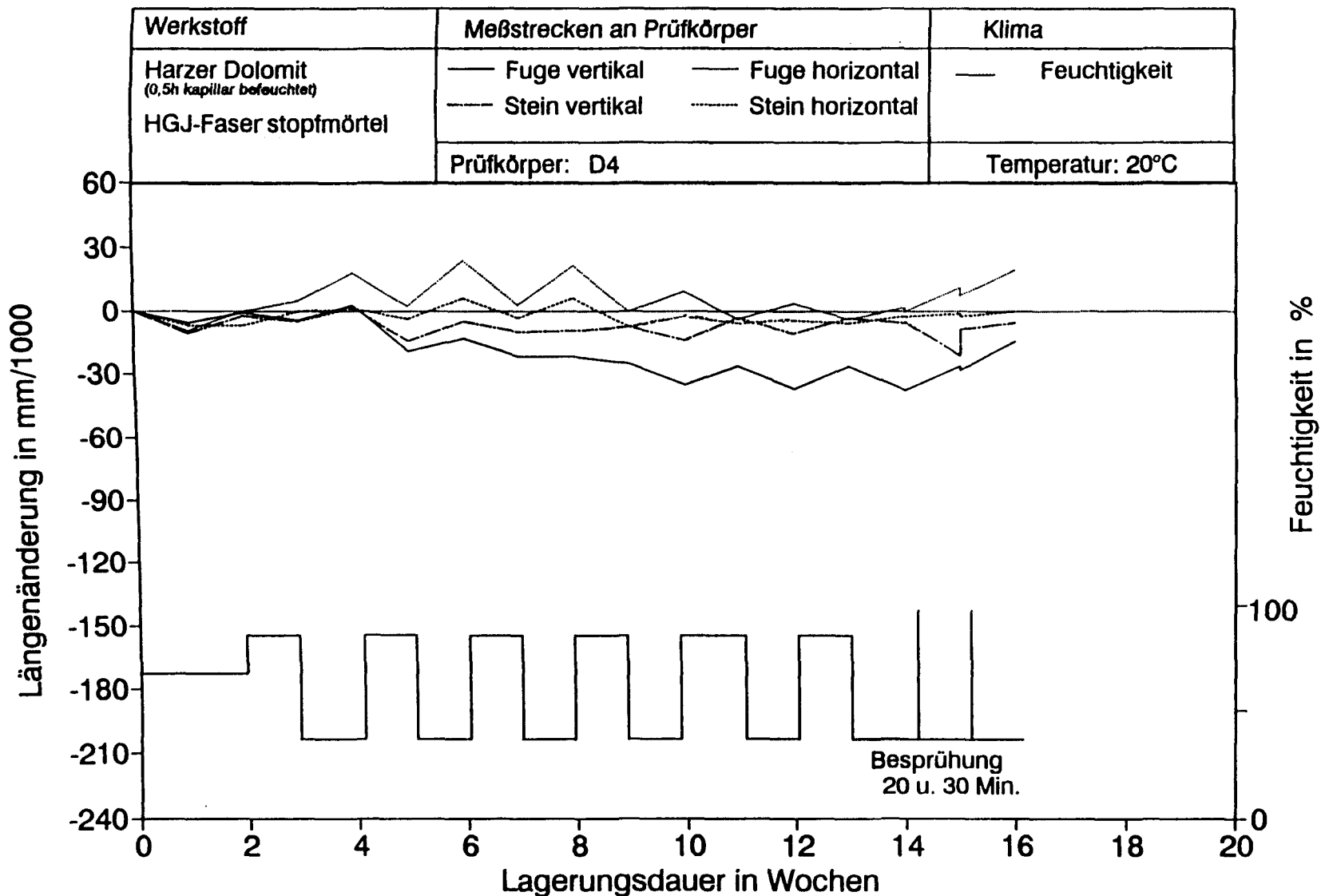


Aufsicht: Stein

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; K - Kohäsion; A - Adhäsion



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

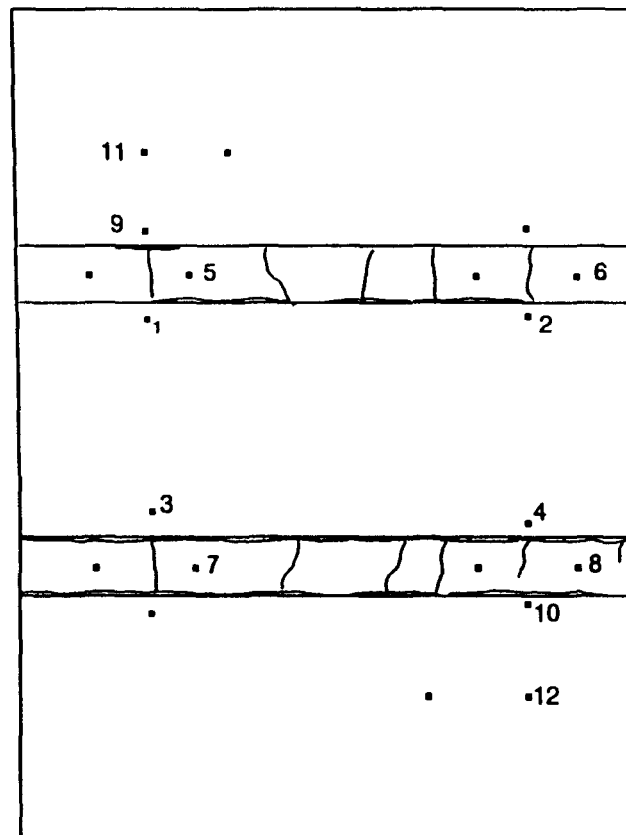
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit / HGJ

Herstellungsdatum: 5.05.92

Messkörper: D4

Klimakammer



A-7: D4 Harzer Dolomit - HGJ (Klimakammer)
A-7b: D4 Rißanalyse

3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 30/28.10.92

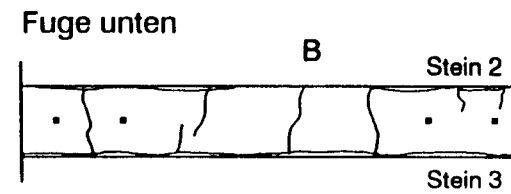
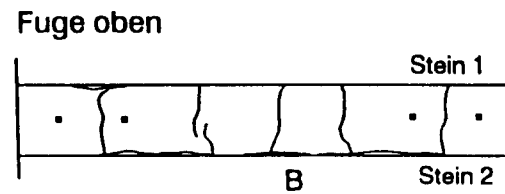
Aufnahmedatum: 12.02.93

Messkörper: D-4

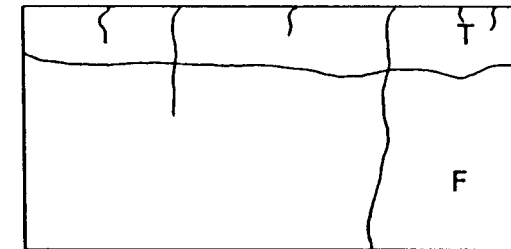
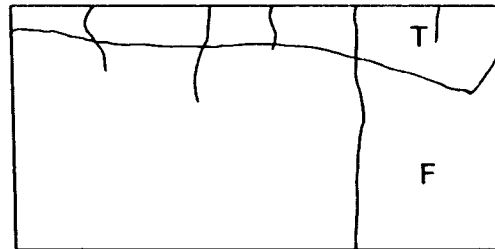
Stein/Mörtel: Dolomit/HGJ

A-7: D4 Harzer Dolomit - HGJ (Klimakammer)
A-7c: D4 Bruchbildaufnahme

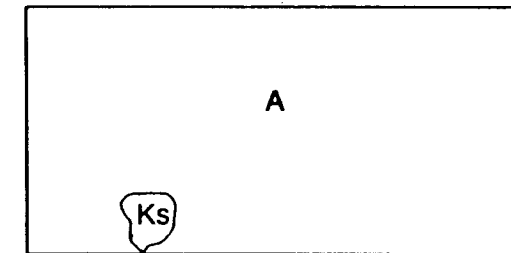
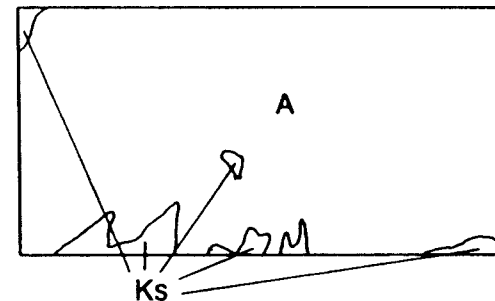
Ansicht:



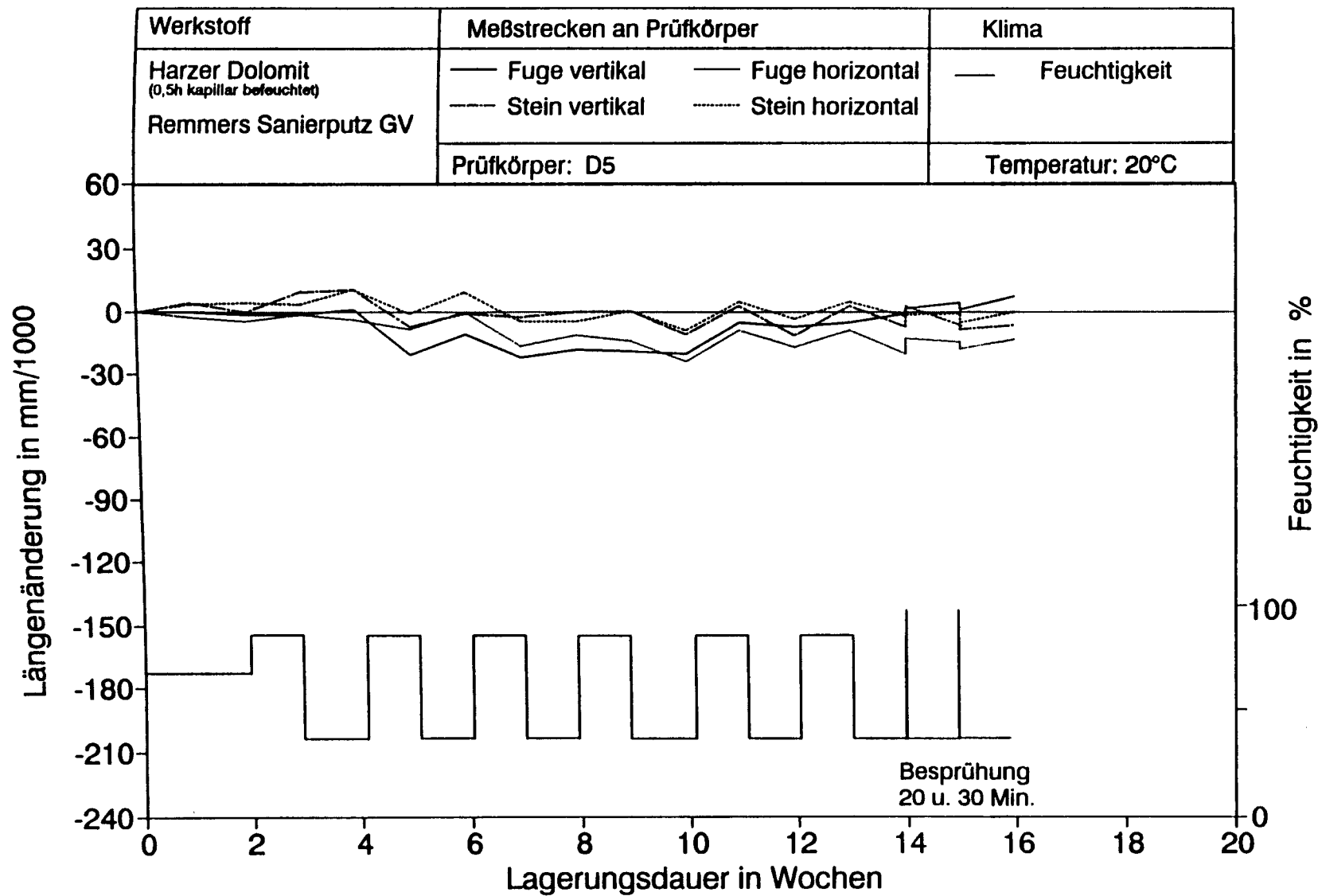
Aufsicht: Mörtel
"Trocken / Feucht"



Aufsicht : Mörtel
"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks - Kohäsionsbruch im Stein



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

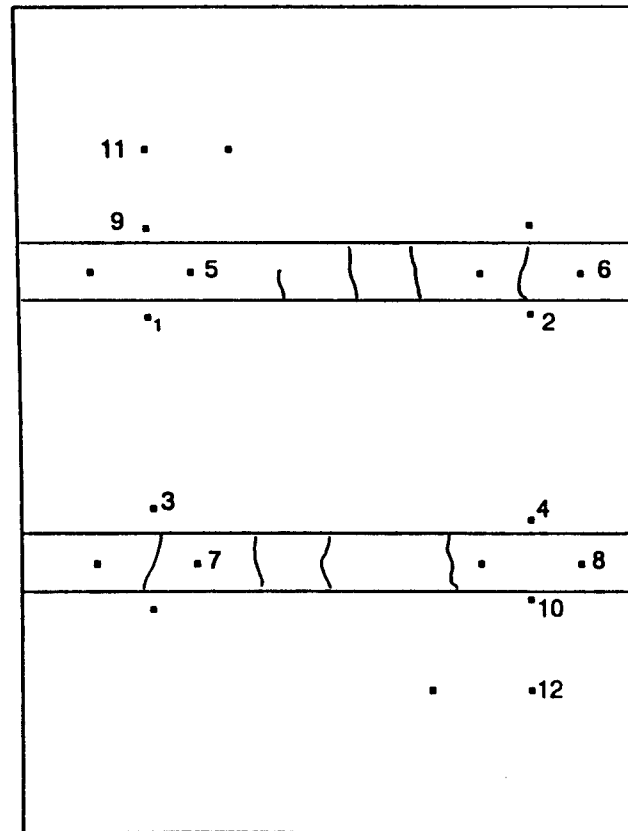
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit / RSGV

Herstellungsdatum: 5.05.92

Messkörper: D5

Klimakammer



A-8: D5 Harzer Dolomit - Sanierputz (Klimakammer)
A-8b: D5 Rißanalyse

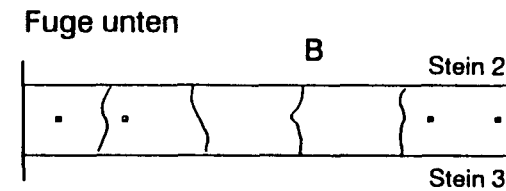
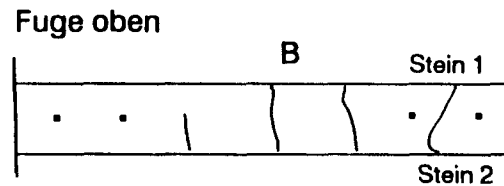
3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 20.11.92
Aufnahmedatum: 11.02.93

Messkörper: D-5

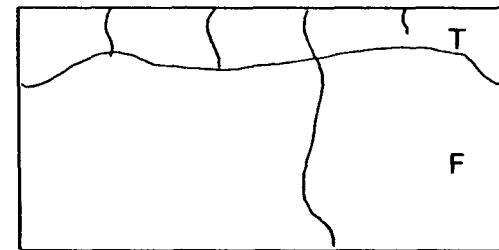
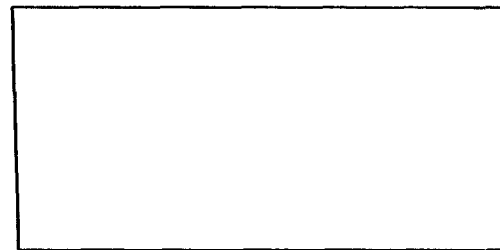
Stein/Mörtel: Dolomit/RSGV

Ansicht:



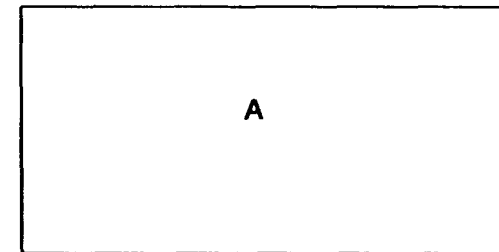
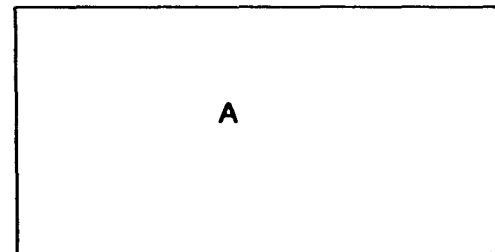
Aufsicht: Mörtel

"Trocken / Feucht"



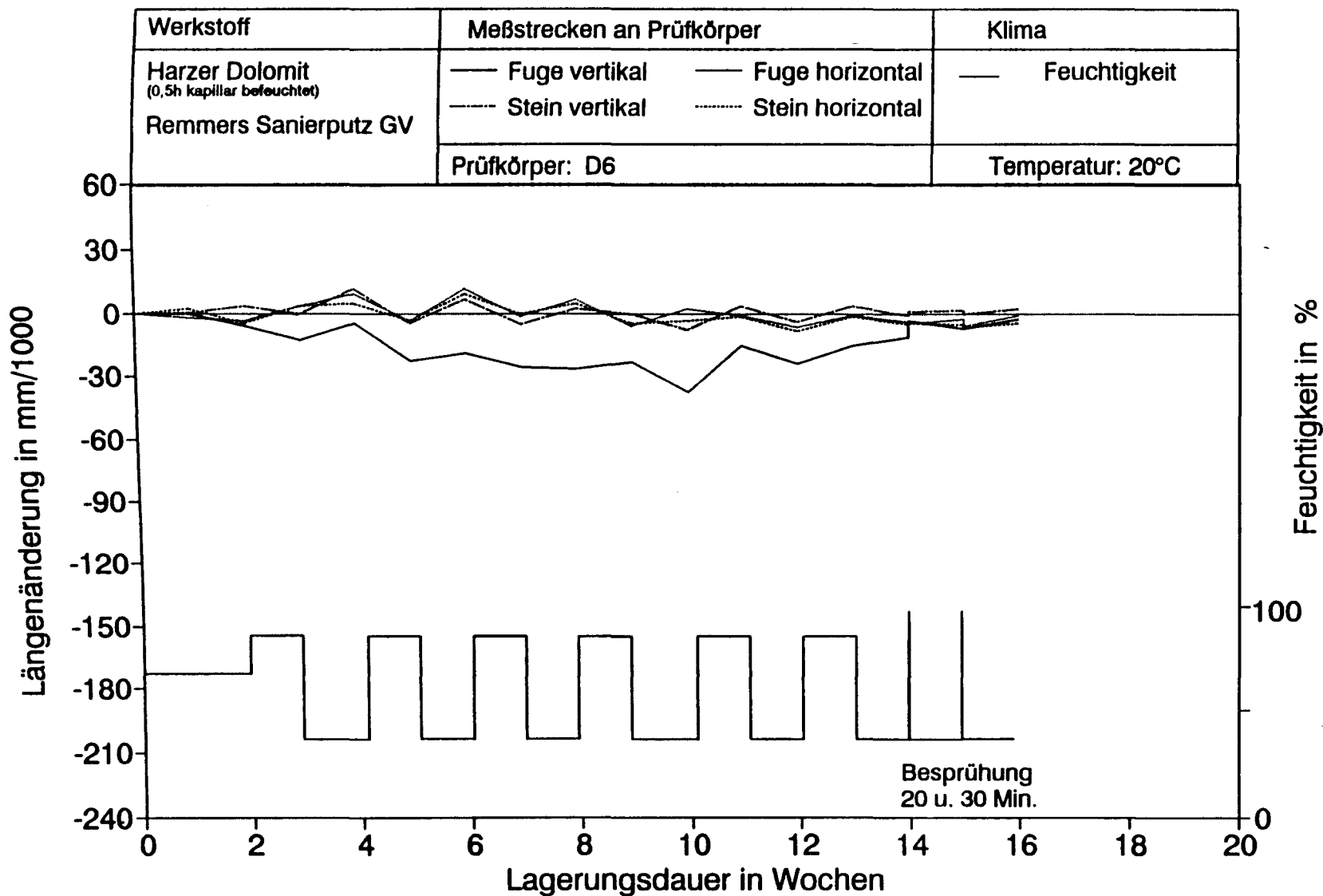
Aufsicht: Stein

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; K - Kohäsion; A - Adhäsion

A-8: D5 Harzer Dolomit - Sanierputz (Klimakammer)
A-8c: D5 Bruchbildaufnahme



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

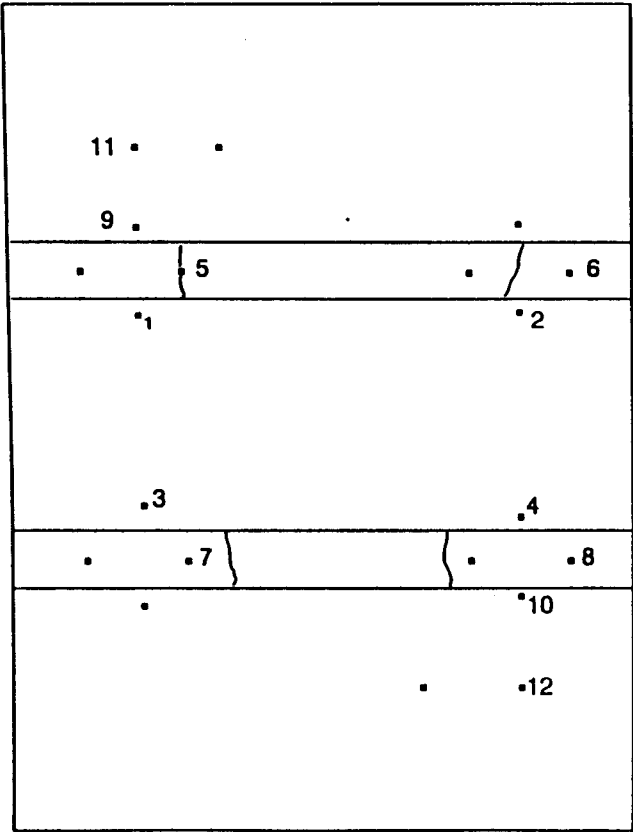
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit / RSGV

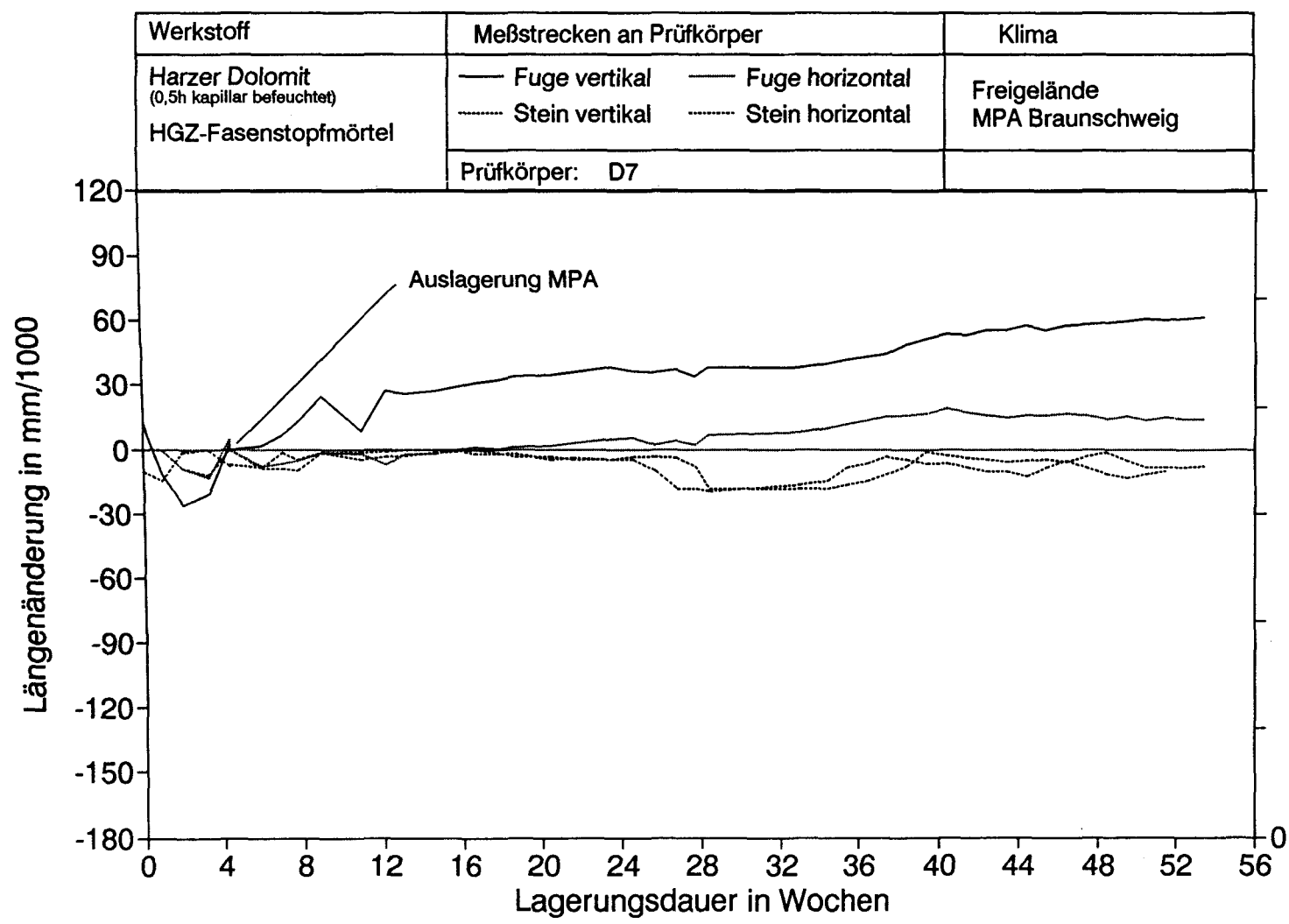
Herstellungsdatum: 5.05.92

Messkörper: D6

Klimakammer



A-9: D6 Harzer Dolomit - Sanierputz (Klimakammer)
A-9b: D6 Rißanalyse



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
bei Freibewitterung MPA Braunschweig

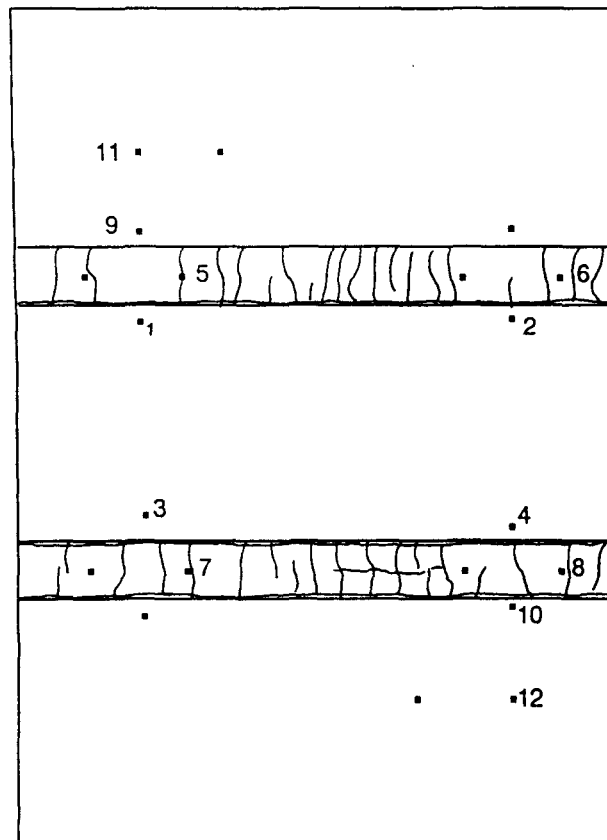
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit/HGZ

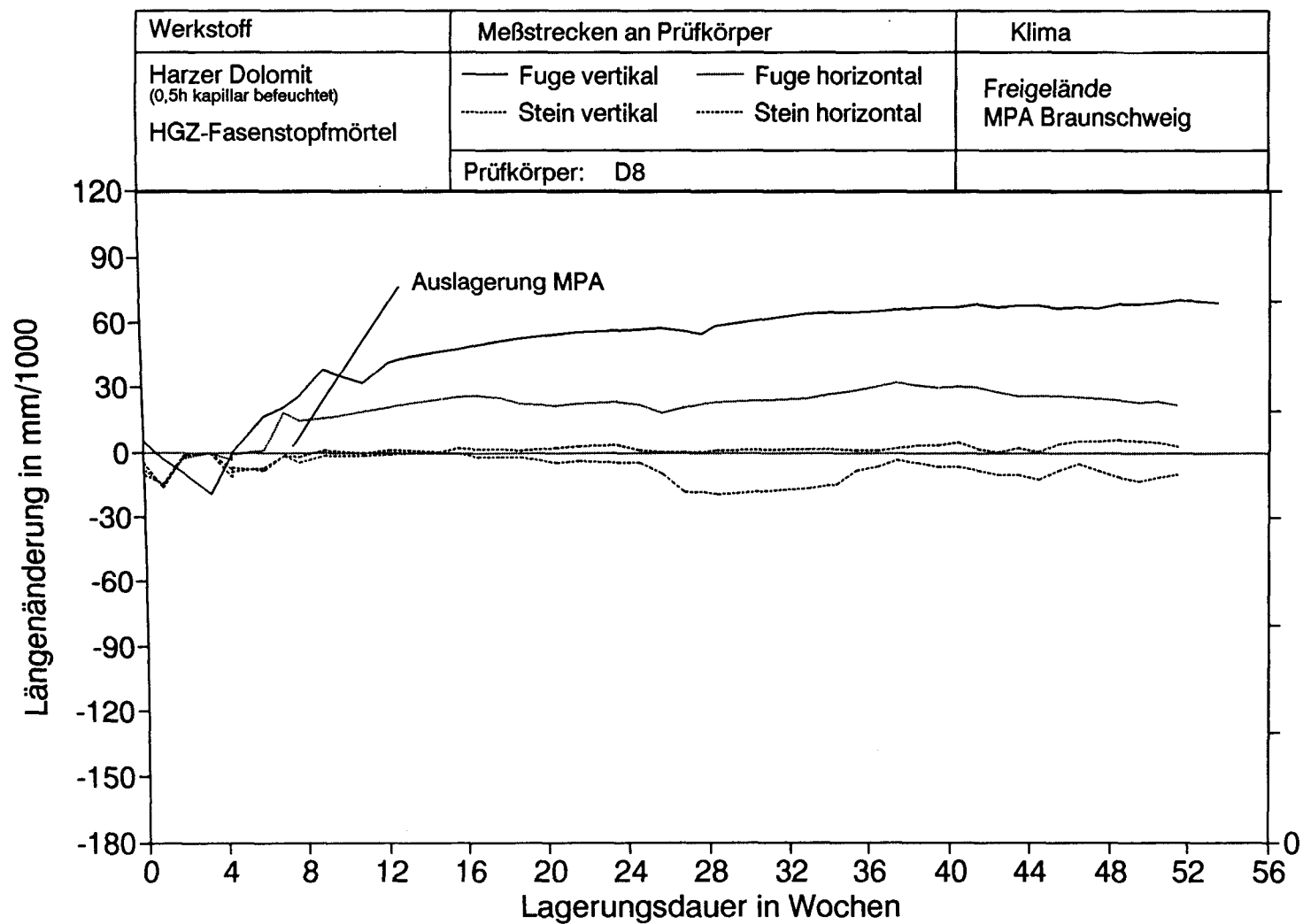
Herstellungsdatum: 26.05.92

Messkörper: D7

MPA Braunschweig



A-10: D7 Harzer Dolomit - HGZ (Braunschweig)
A-10b: D7 Rißanalyse



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
bei Freibewitterung MPA Braunschweig

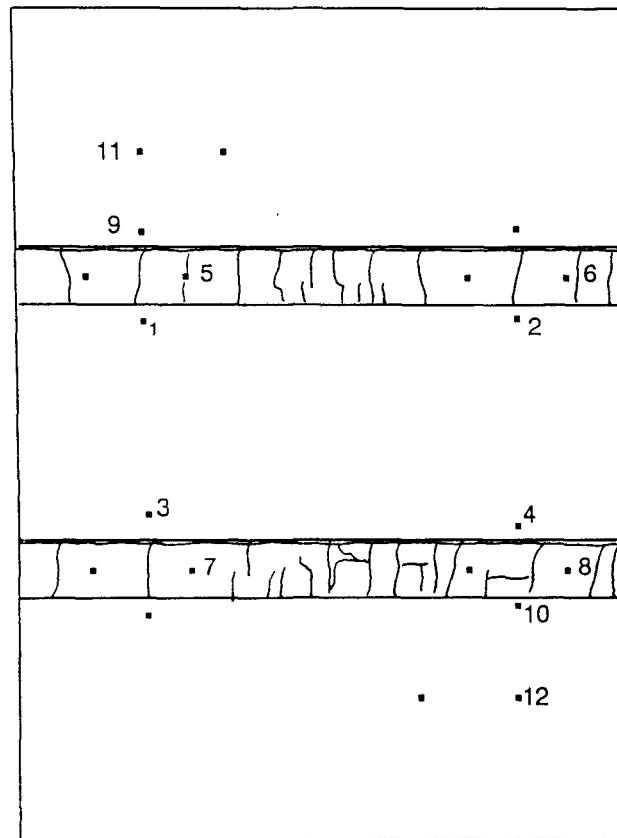
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit/HGZ

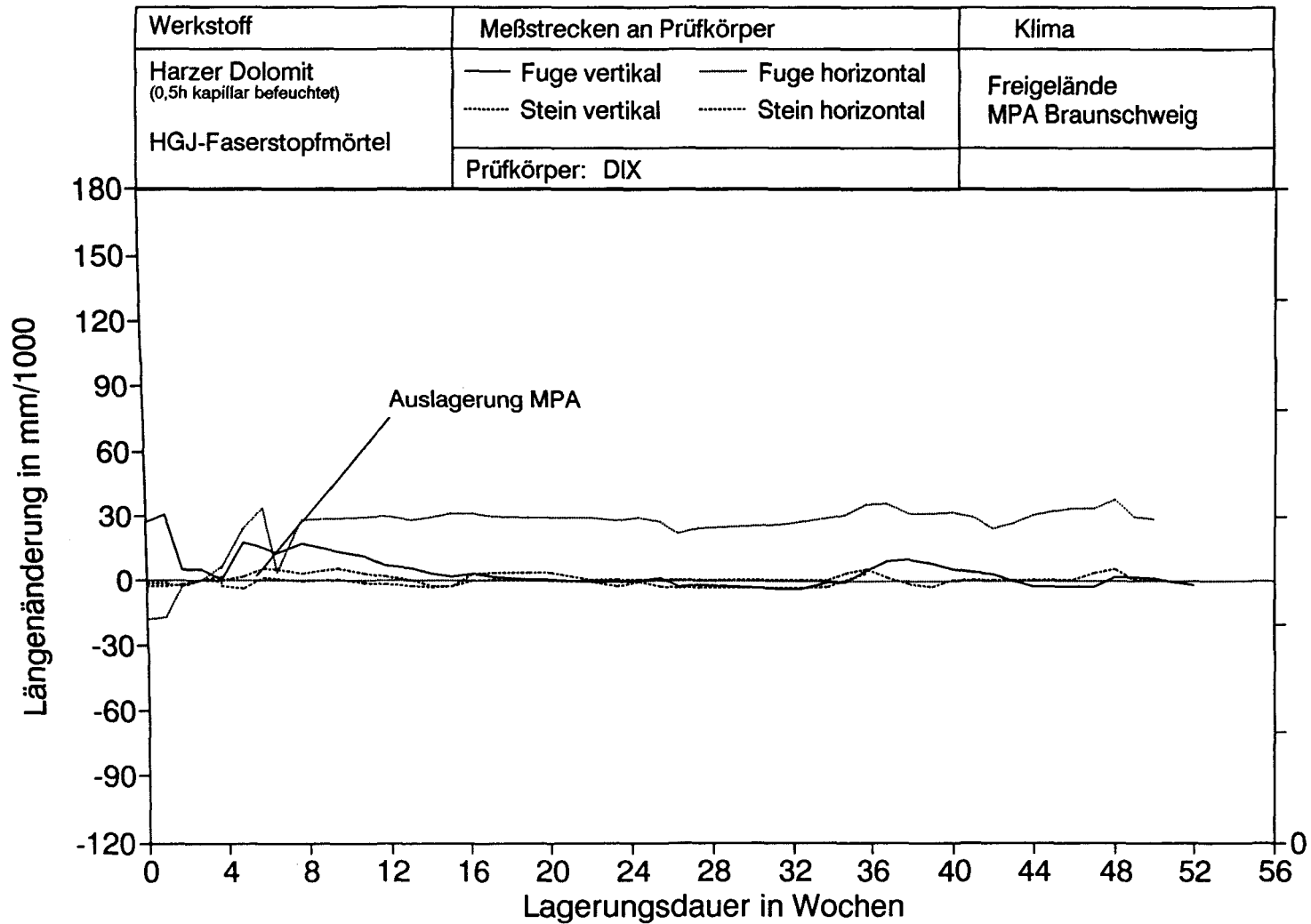
Herstellungsdatum: 26.05.92

Messkörper: D8

MPA Braunschweig



A-11: D8 Harzer Dolomit - HGZ (Braunschweig)
A-11b: D8 Rißanalyse



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
bei Freibewitterung MPA Braunschweig

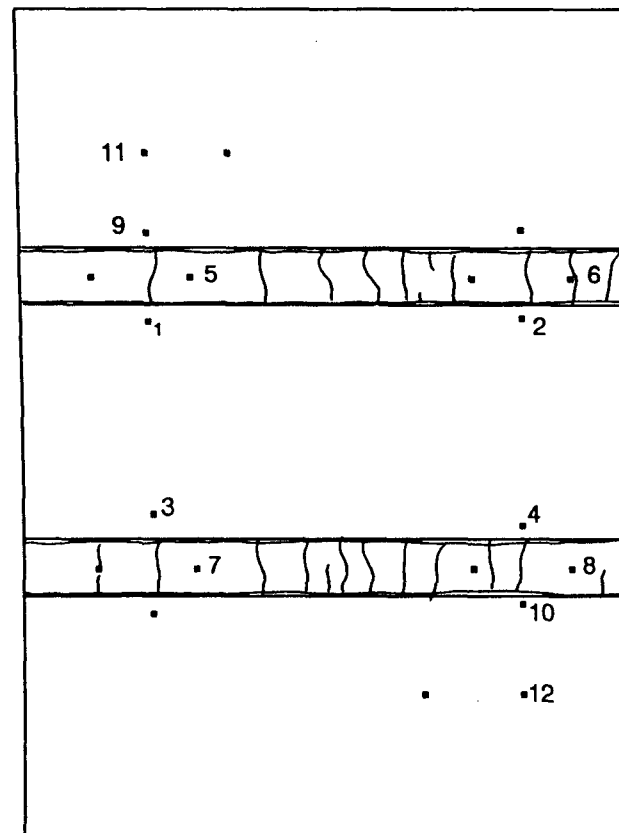
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit/HGJ

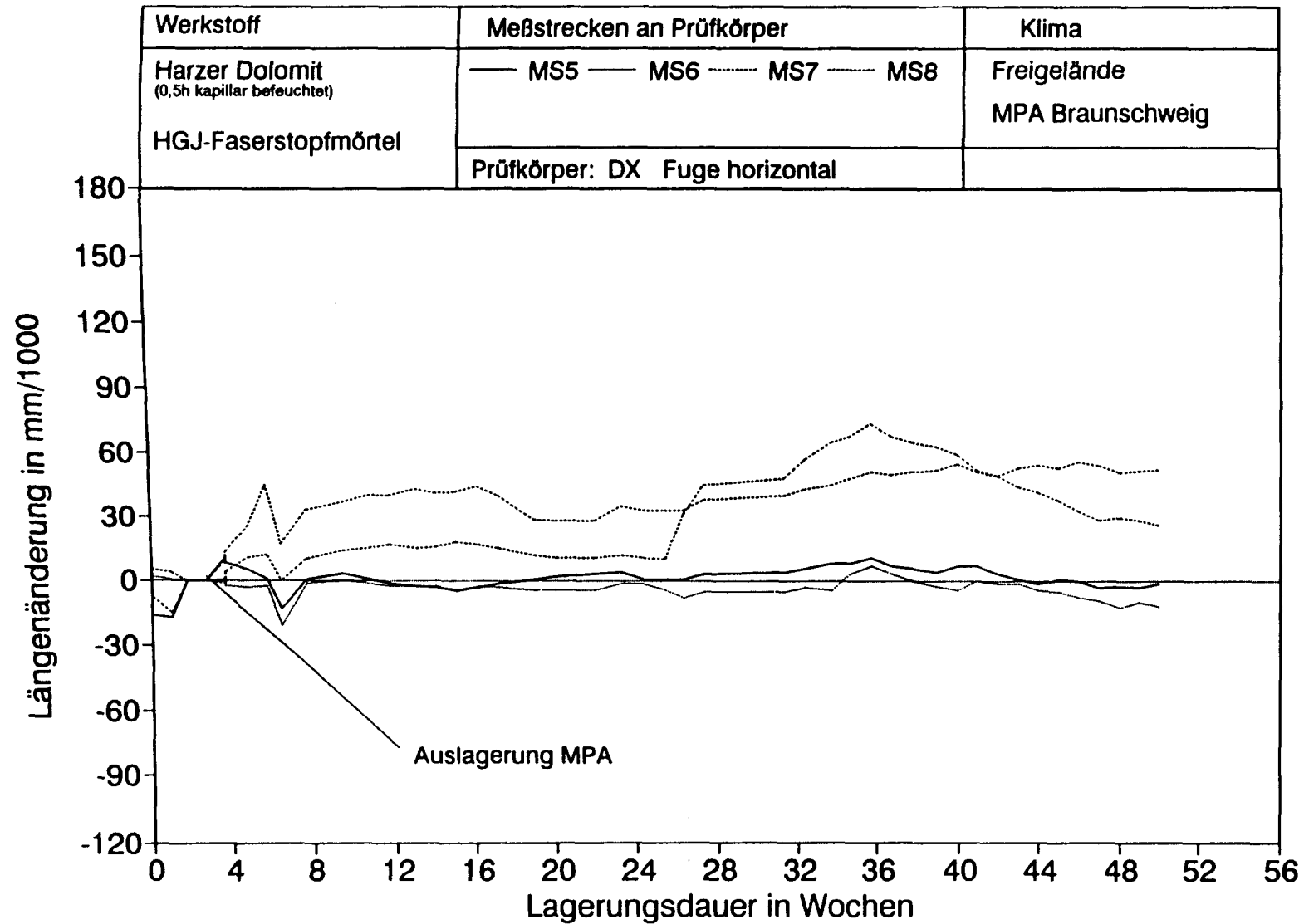
Herstellungsdatum: 04.06.92

Messkörper: D9

MPA Braunschweig



A-12: D9 Harzer Dolomit - HGJ (Braunschweig)
A-12b: D9 Rißanalyse



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
bei Freibewitterung MPA Braunschweig

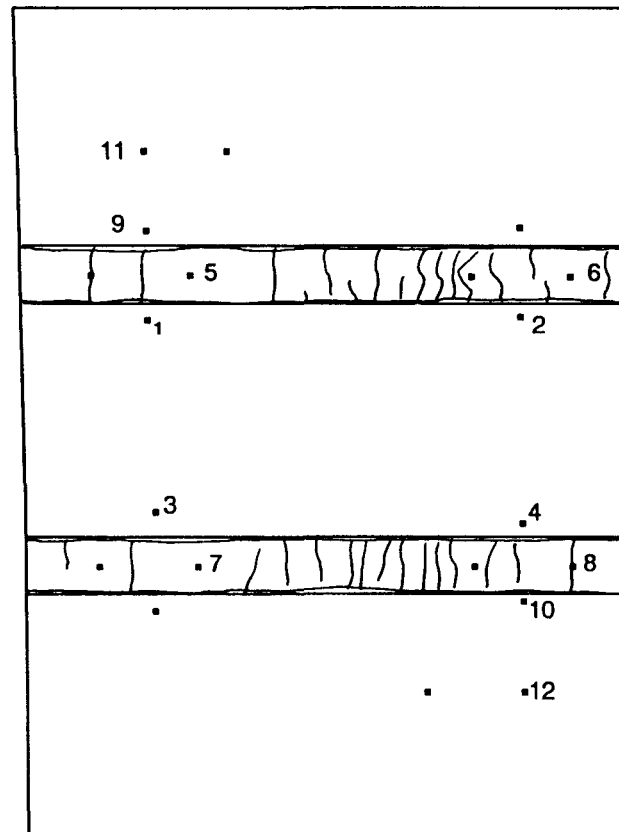
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit/HGJ

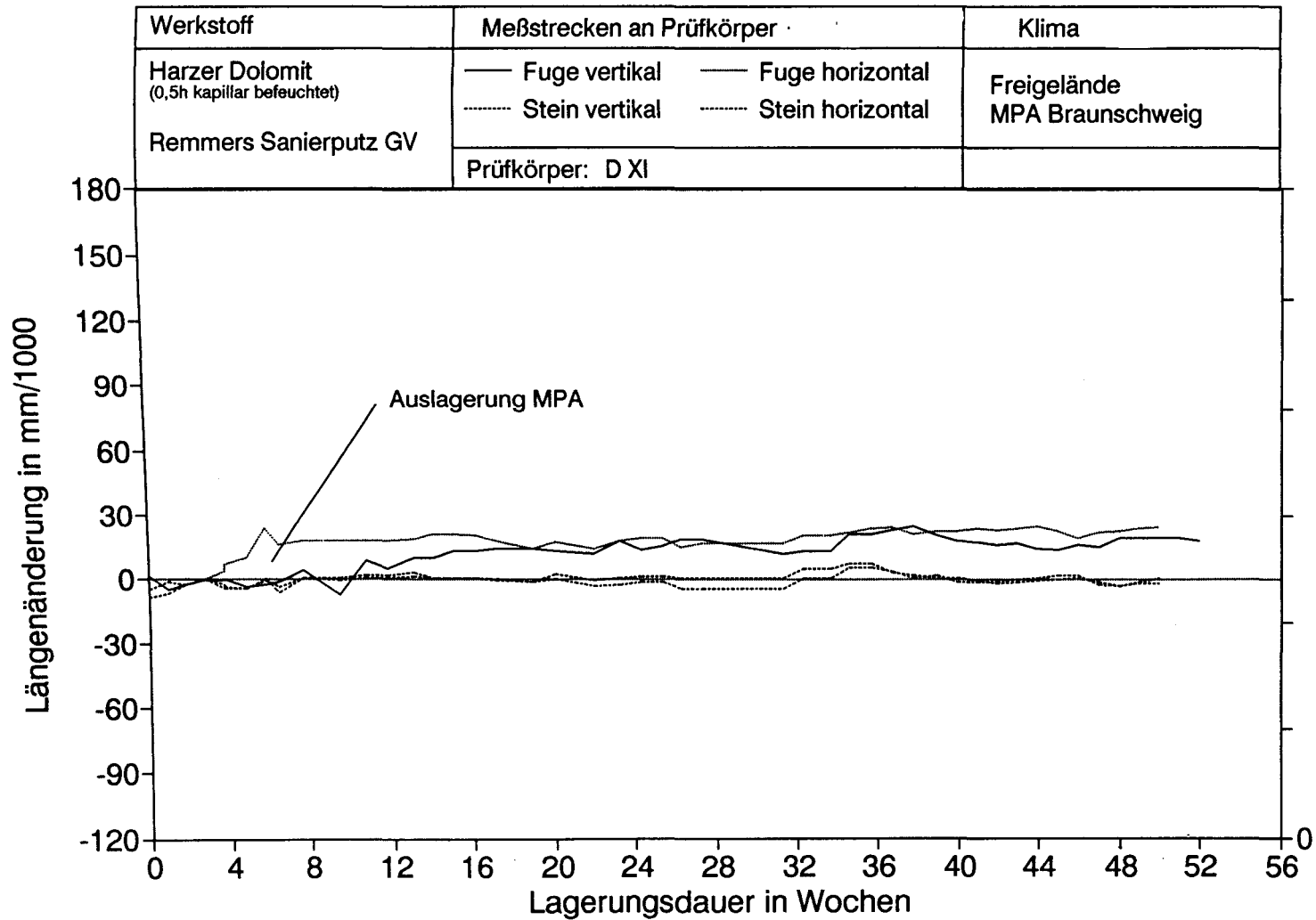
Herstellungsdatum: 04.06.92

Messkörper: D10

MPA Braunschweig



A-13: D10 Harzer Dolomit - HGJ (Braunschweig)
A-13b: D10 Rißanalyse



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
bei Freibewitterung MPA Braunschweig

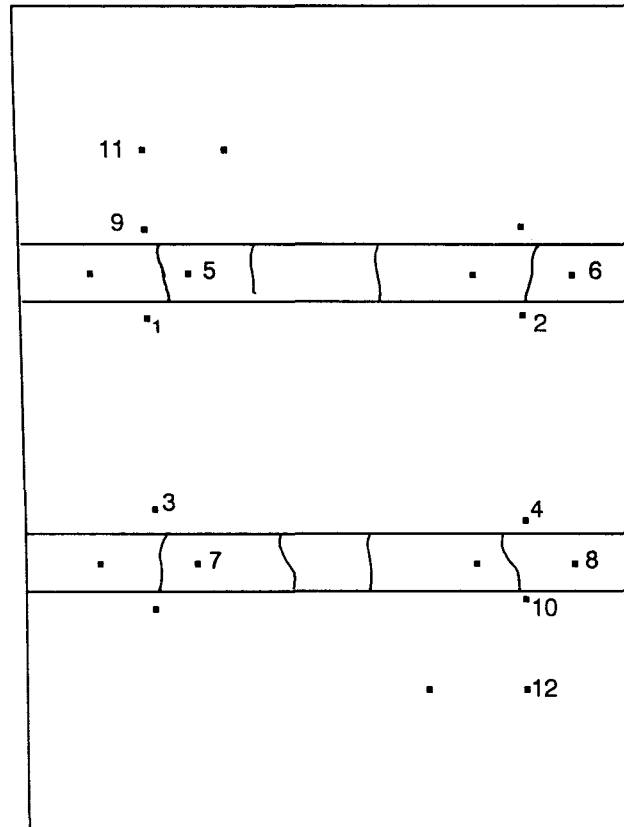
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

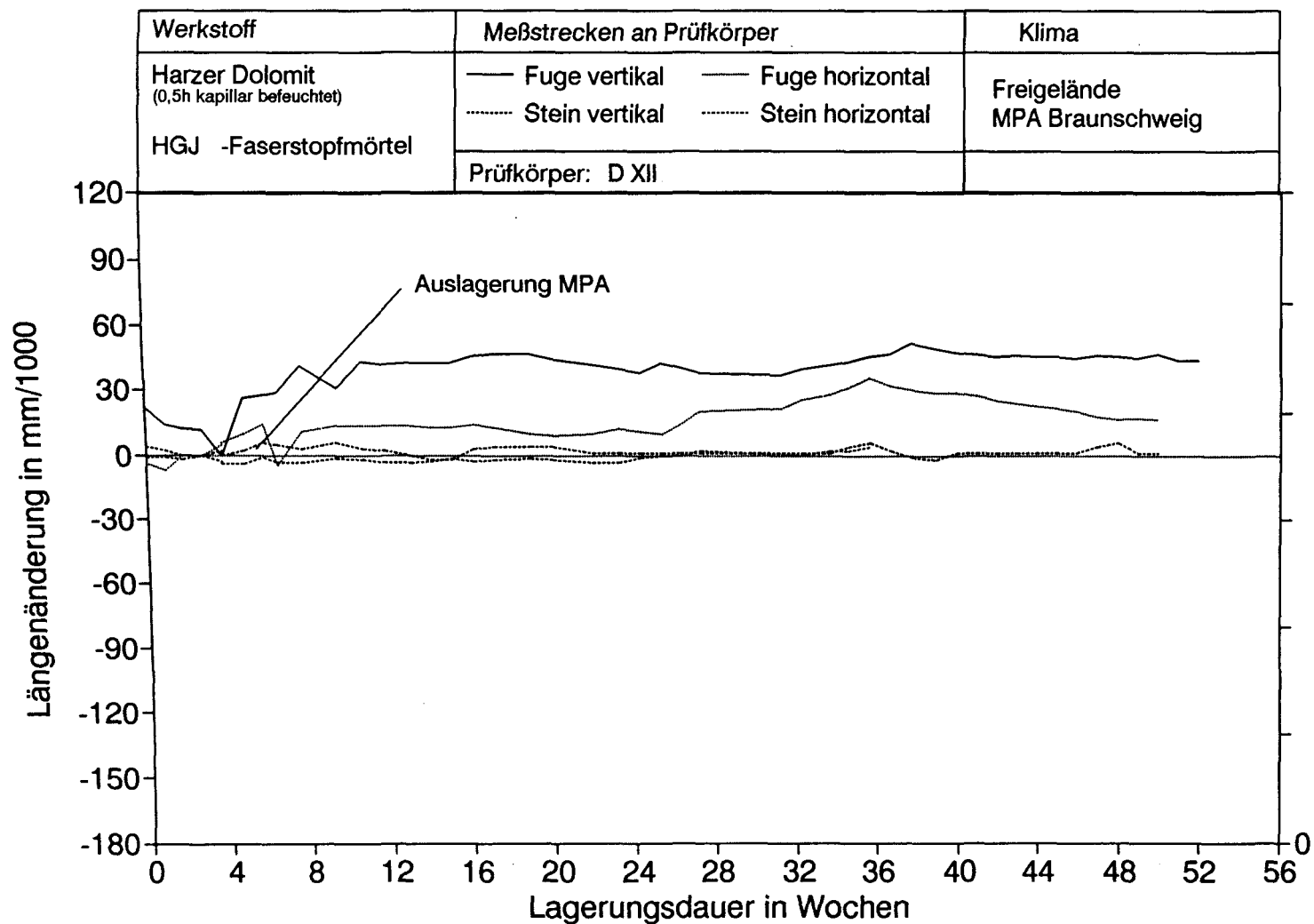
Stein/Mörtel: Dolomit/ReGV

Herstellungsdatum: 04.06.92

Messkörper: D11

MPA Braunschweig





Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
bei Freibewitterung MPA Braunschweig

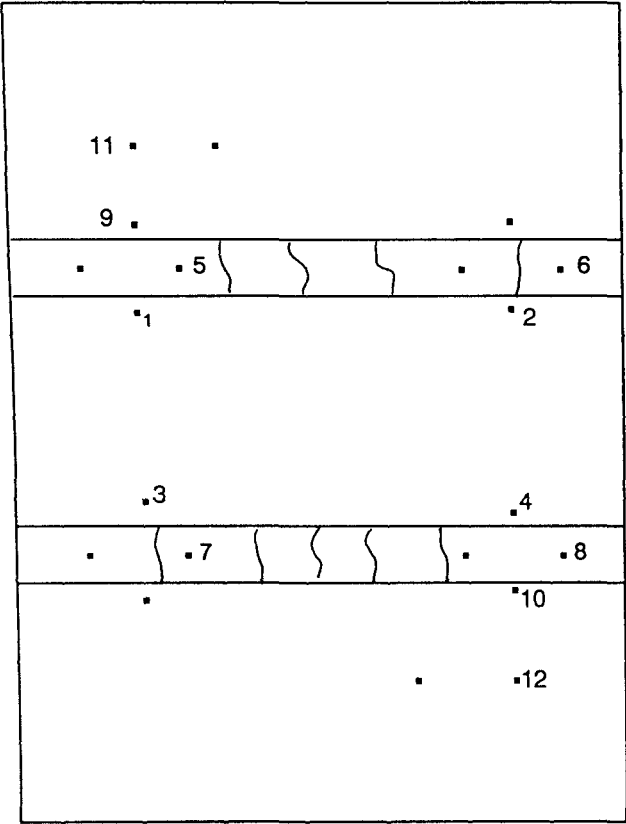
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit/ReGV

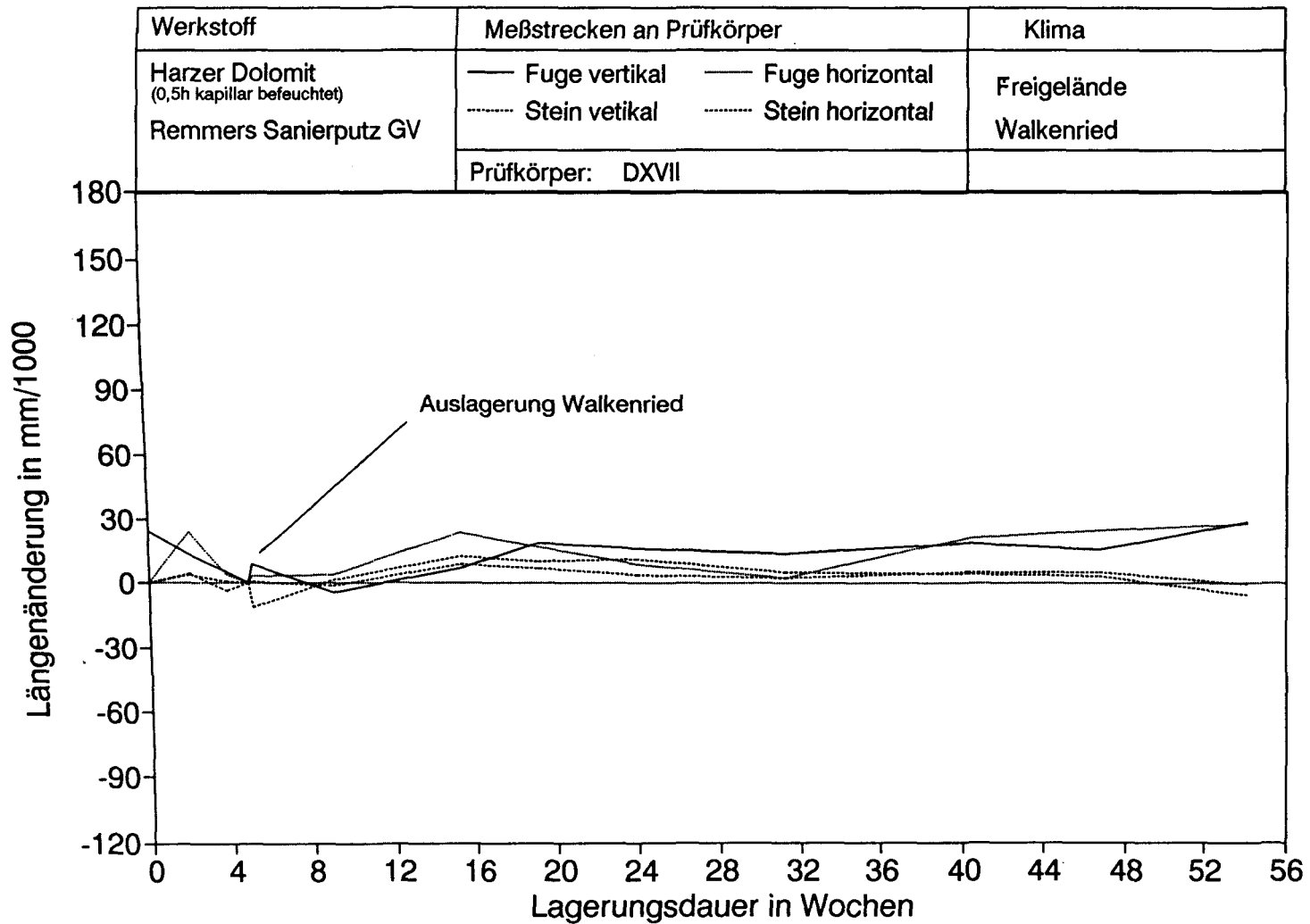
Herstellungsdatum: 04.06.92

Messkörper: D12

MPA Braunschweig



A-15: D12 Harzer Dolomit - Sanierputz (Braunschweig)
A-15b: D12 Rißanalyse



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
bei Freibewitterung (Walkenried)

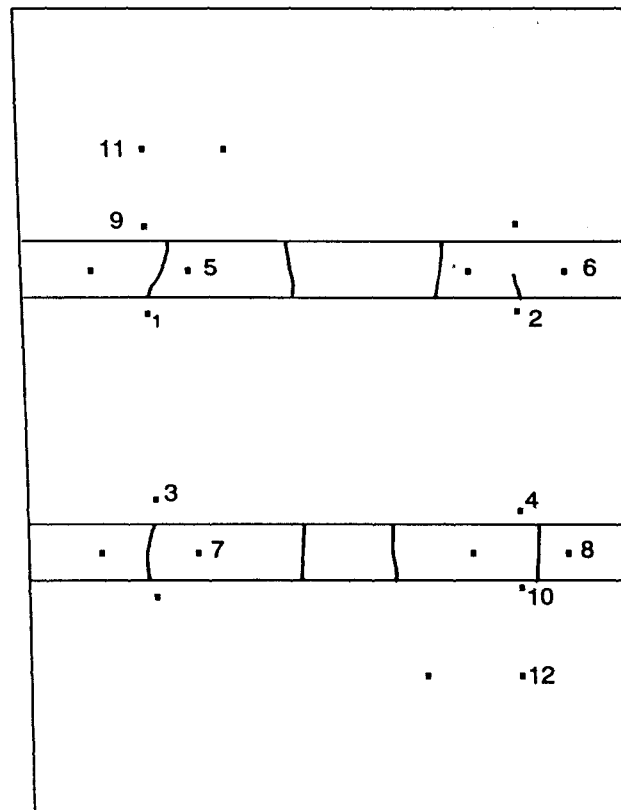
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

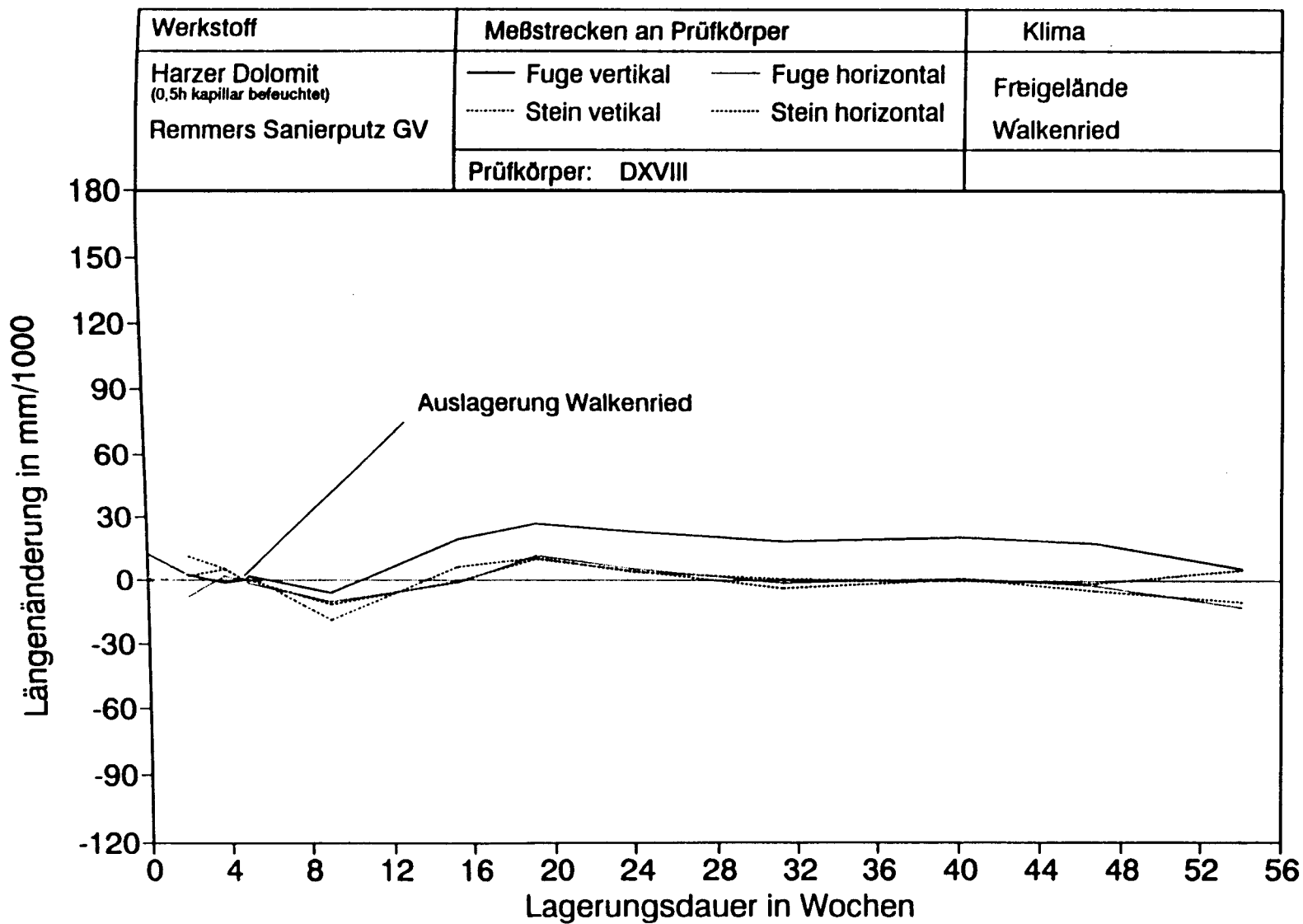
Stein/Mörtel: Dolomit/ReGV

Herstellungsdatum: 16.06.92

Messkörper: D17

Südharz





Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Harzer Dolomit
bei Freibewitterung (Walkenried)

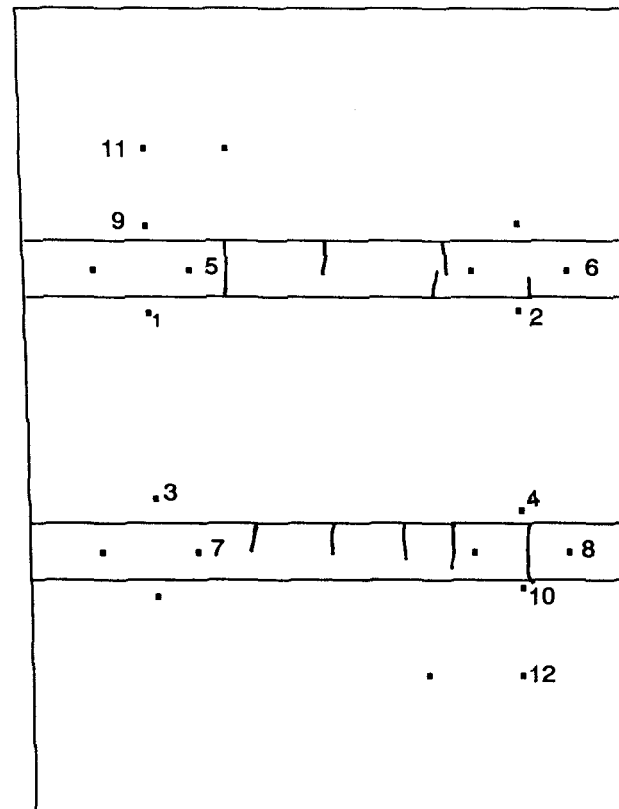
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Dolomit/ReGV

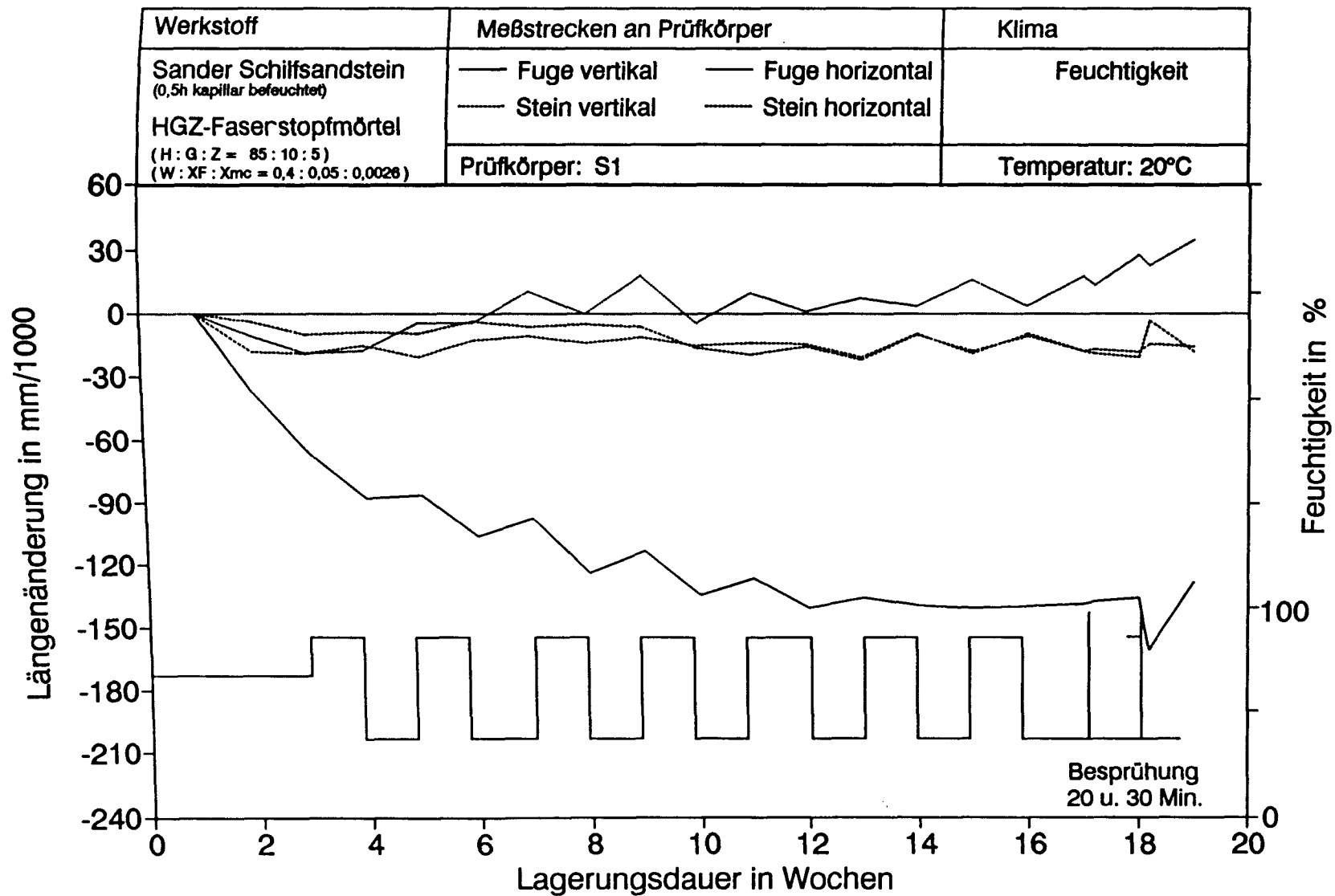
Herstellungsdatum: 16.06.92

Messkörper: D18

Südharz



A-17: D18 Harzer Dolomit - Sanierputz (Südharz)
A-17b: D18 Rißanalyse



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Sander Schilfsandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtewechsel

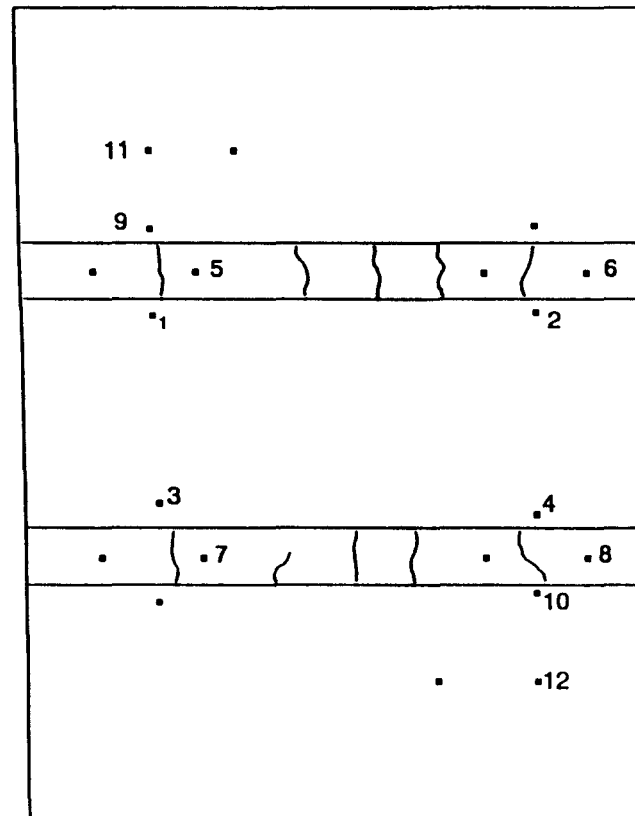
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Schilfsandstein /HGZ

Herstellungsdatum: 21.04.92

Messkörper: S1

Klimakammer



A-18: S1 Schilfsandstein - HGZ (Klimakammer)
A-18b: S1 Rißanalyse

3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

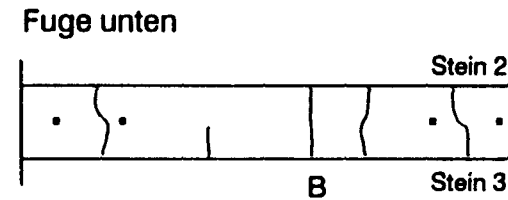
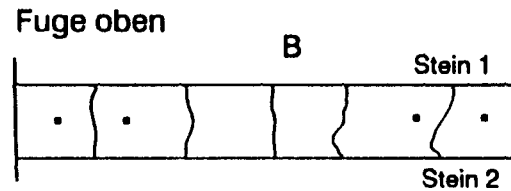
Prüfdatum: 22/26.10.92

Aufnahmedatum: 11.02.93

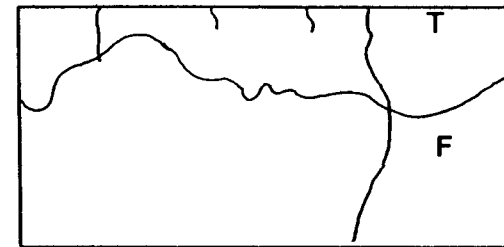
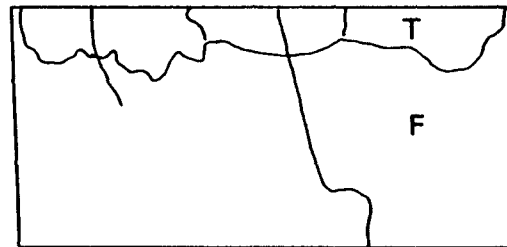
Messkörper: S-1

Stein/Mörtel: Schilfsandstein/HGZ

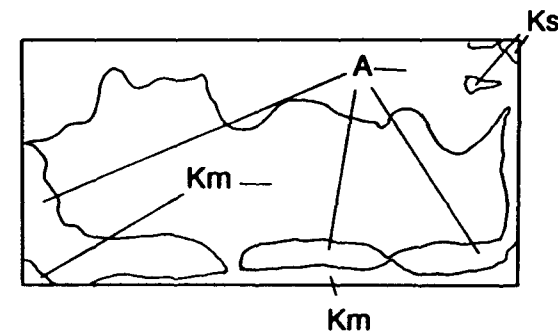
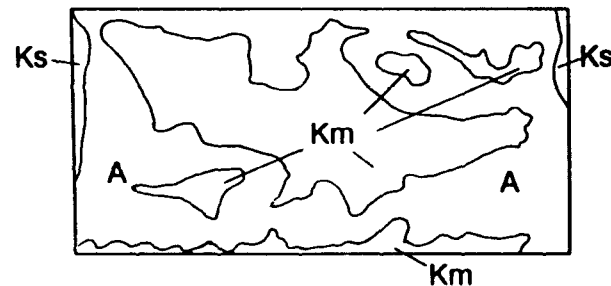
Ansicht:



Aufsicht: Mörtel
"Trocken / Feucht"

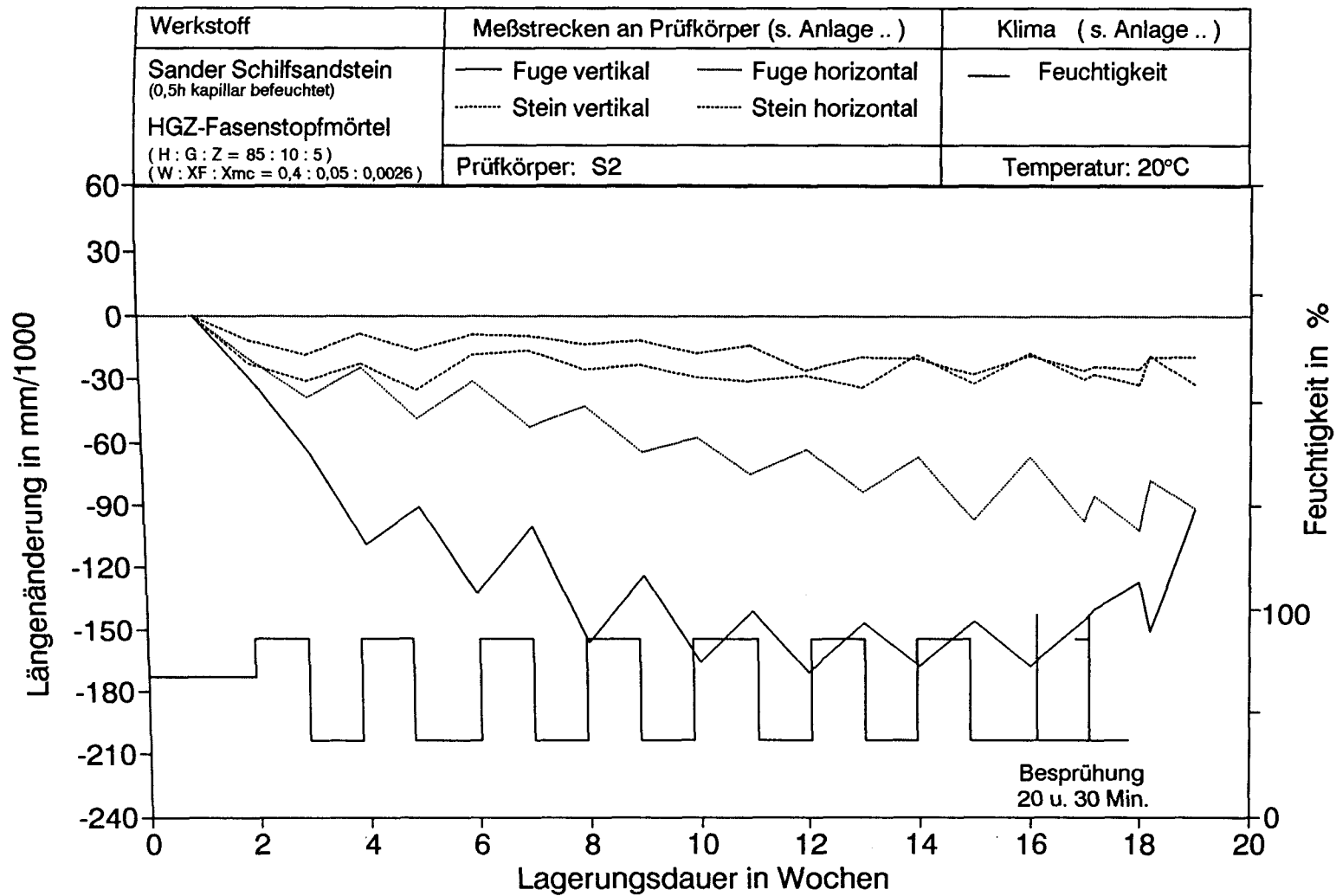


Aufsicht: Stein
"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks -, Km - Kohäsionbruch im Stein, im Mörtel

A-18: S1 Schilfsandstein - HGZ (Klimakammer)
A-18c: S1 Bruchbildaufnahme



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Sander Schilfsandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

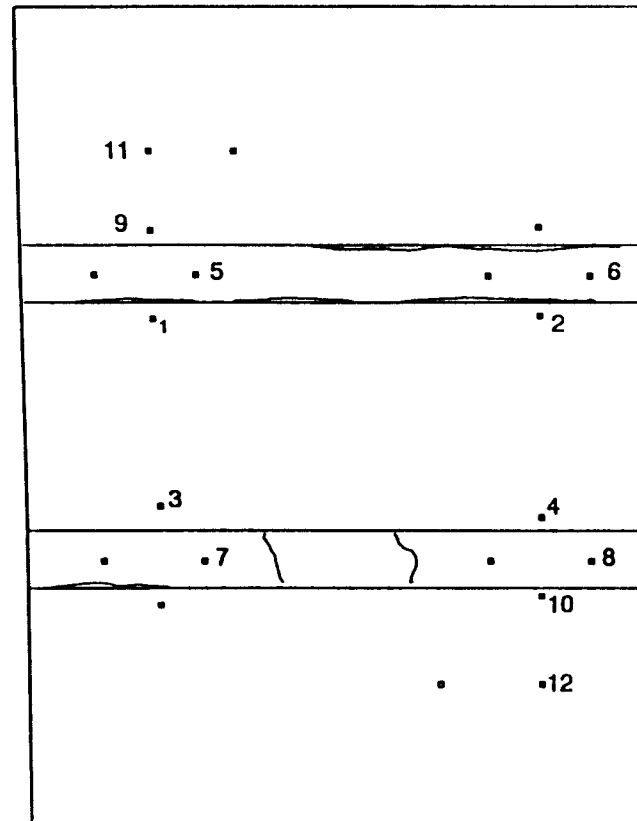
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Schilfsandstein /HGZ

Herstellungsdatum: 21.04.92

Messkörper: S2

Klimakammer



A-19: S2 Schilfsandstein - HGZ (Klimakammer)
A-19b: S2 Rißanalyse

3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 28.10.92

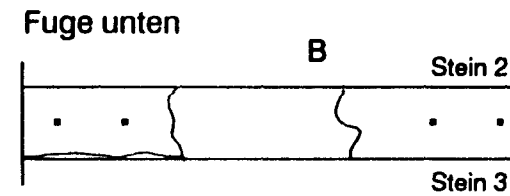
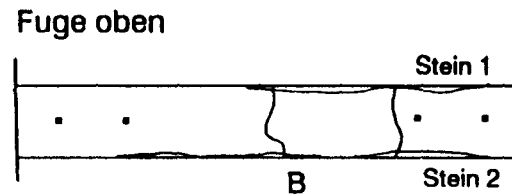
Aufnahmedatum: 11.02.93

Messkörper: S-2

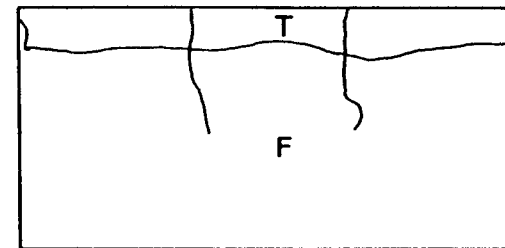
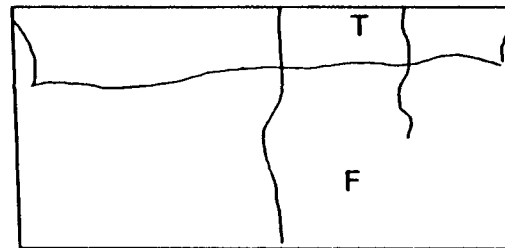
Stein/Mörtel: Schilfsandstein/HGZ

A-19: S2 Schilfsandstein - HGZ (Klimakammer)
A-19c: S2 Bruchbildaufnahme

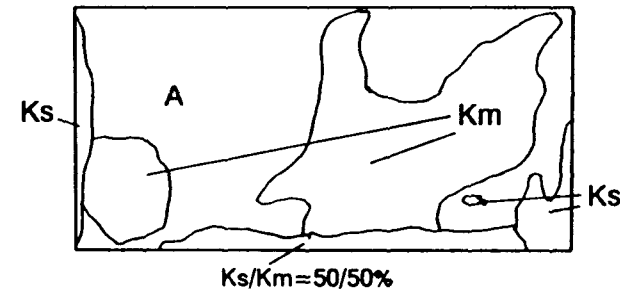
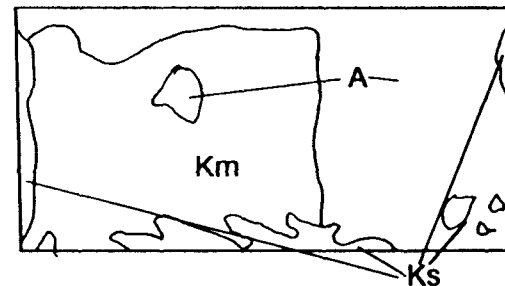
Ansicht:



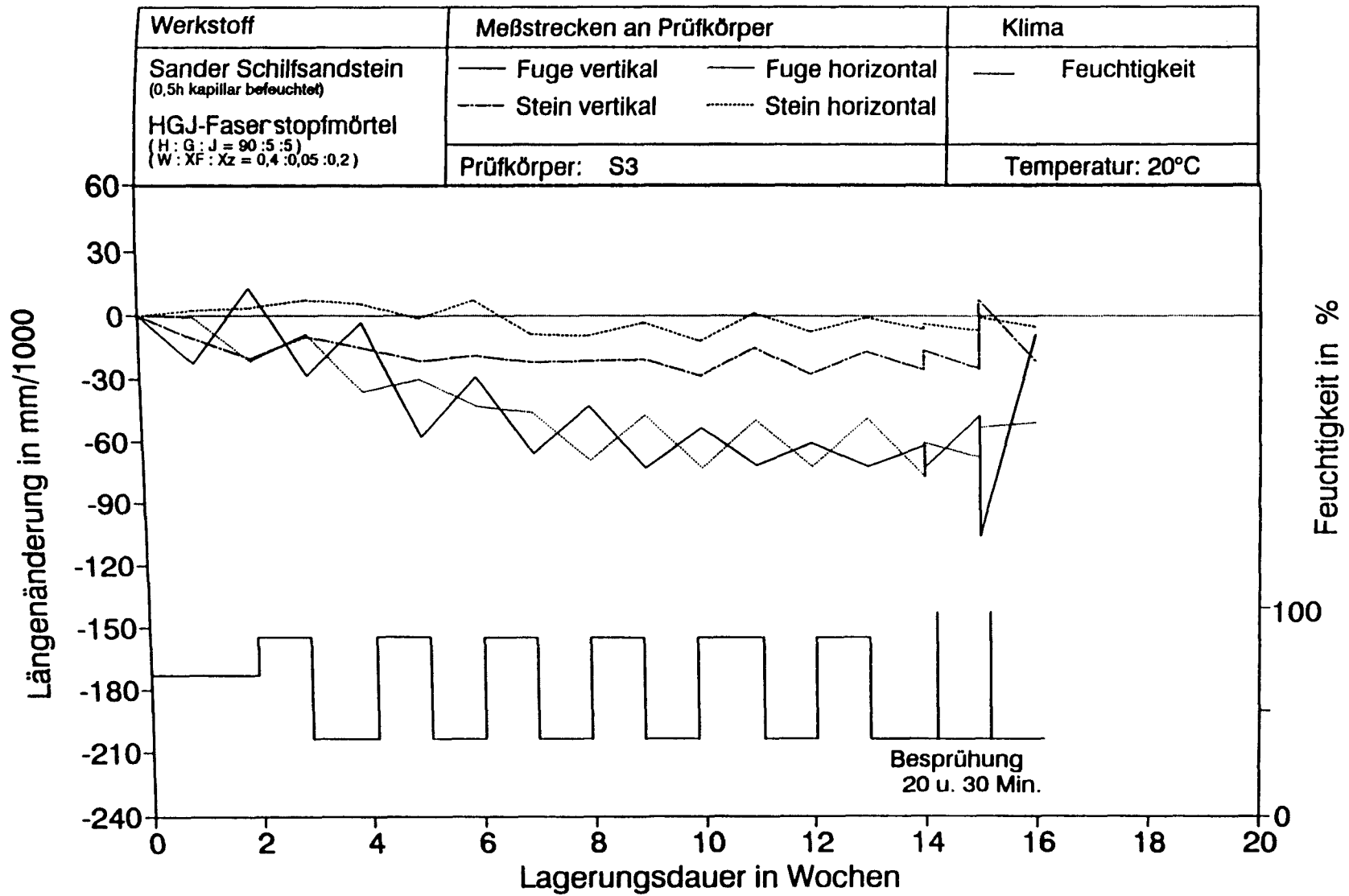
Aufsicht: Mörtel
"Trocken / Feucht"



Aufsicht: Mörtel / Stein
"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks - Kohäsionbruch im Stein, im Mörtel



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Sander Schilfsandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

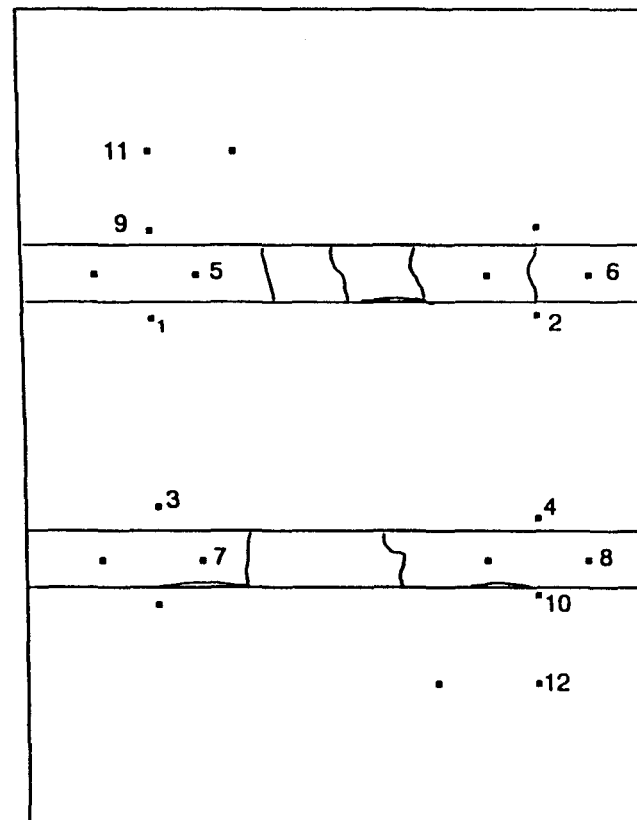
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Schilfsandstein / HGJ

Herstellungsdatum: 5.05.92

Messkörper: S3

Klimakammer



A-20: S3 Schilfsandstein - HGJ (Klimakammer)
A-20b: S3 Rißanalyse

3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

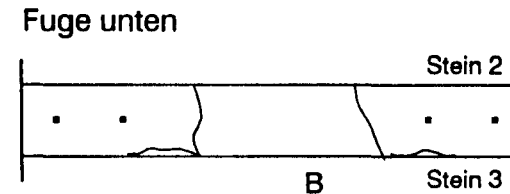
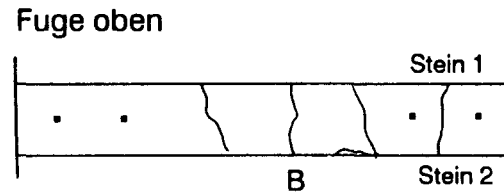
Prüfdatum: 22/26.10.92

Aufnahmedatum: 11.02.93

Messkörper: S-3

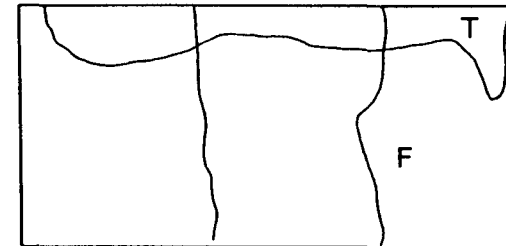
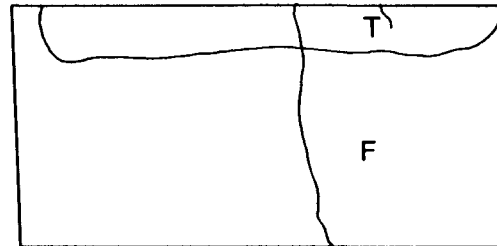
Stein/Mörtel: Schilfsandstein/HGJ

Ansicht:



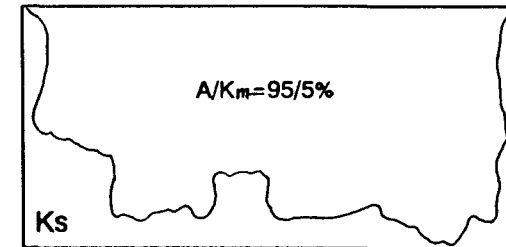
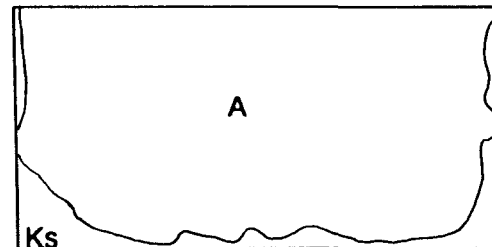
Aufsicht: Mörtel

"Trocken / Feucht"



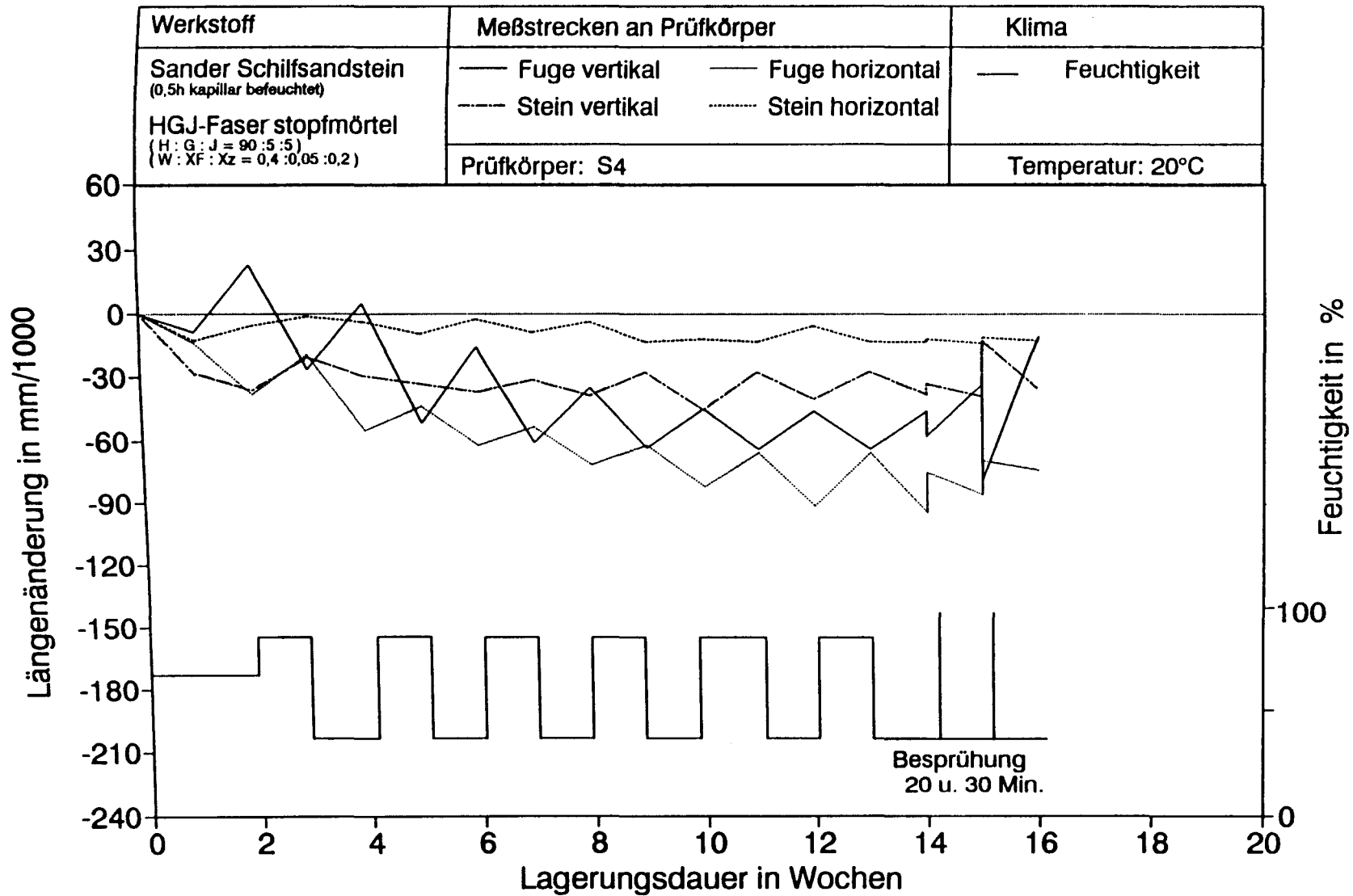
Aufsicht: Mörtel

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks -, Km - Kohäsionsbruch im Stein, im Mörtel

A-20: S3 Schilfsandstein - HGJ (Klimakammer)
A-20c: S3 Bruchbildaufnahme



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Sander Schilfsandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

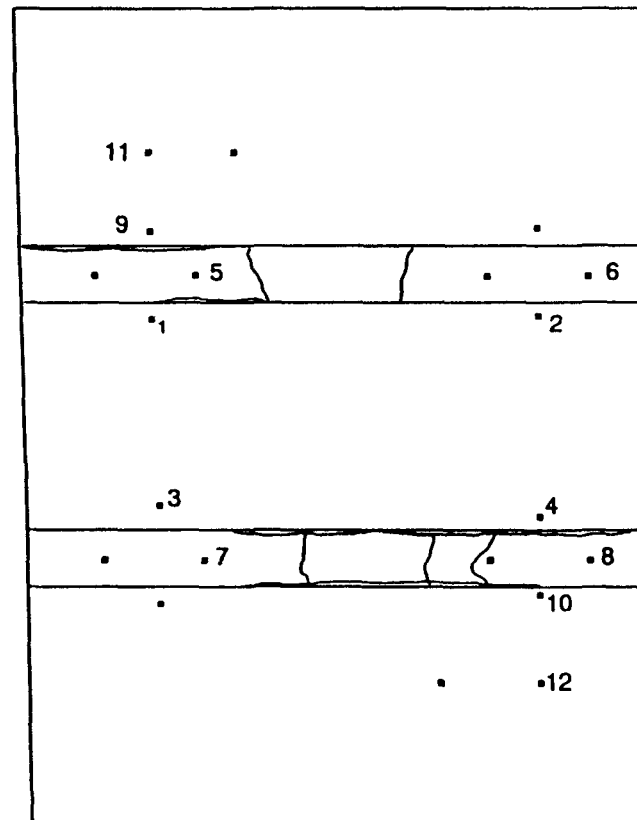
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Schilfsandstein / HGJ

Herstellungsdatum: 5.05.92

Messkörper: S4

Klimakammer



3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 19/20.10.92

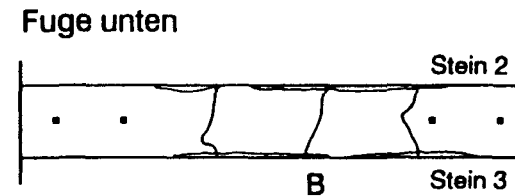
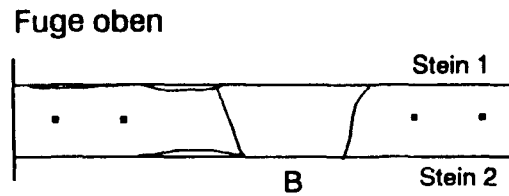
Aufnahmedatum: 11.02.93

Messkörper: S-4

Stein/Mörtel: Schilfsandstein/HGJ

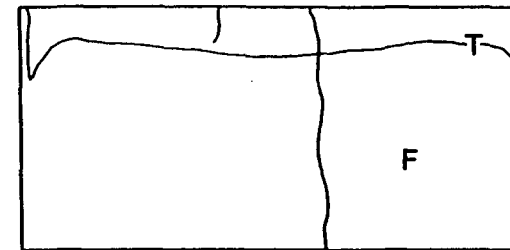
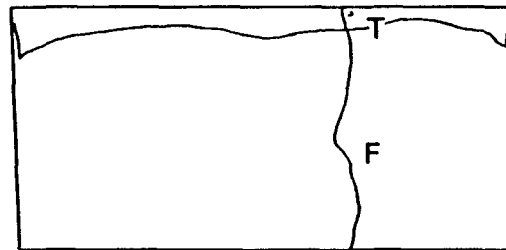
A-21: S4 Schilfsandstein - HGJ (Klimakammer)
A-21c: S4 Bruchbildaufnahme

Ansicht:



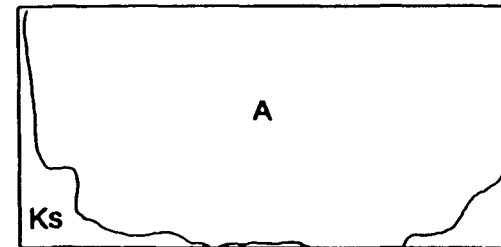
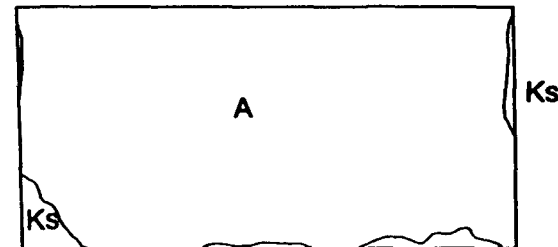
Aufsicht: Mörtel

"Trocken / Feucht"

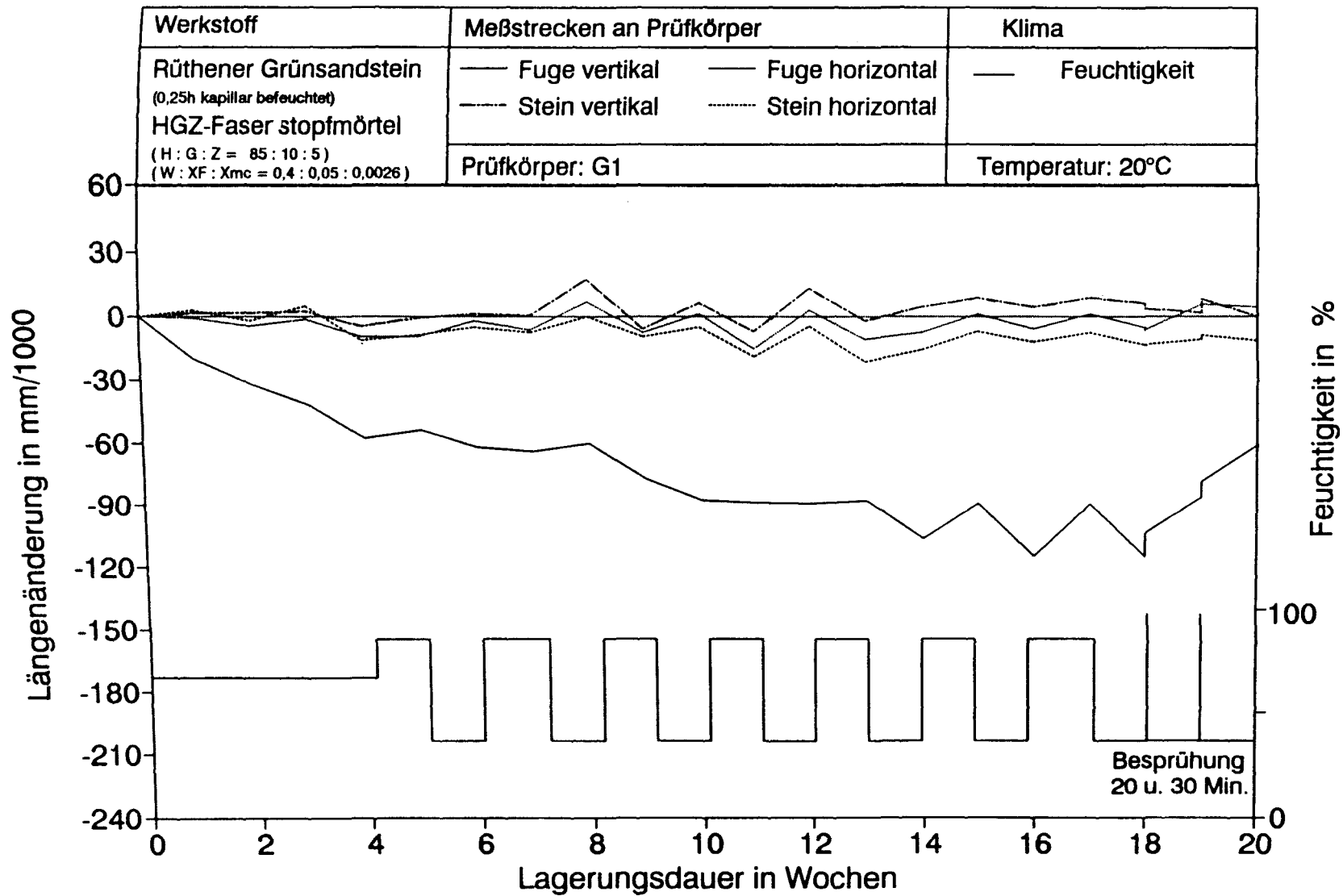


Aufsicht: Mörtel

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks -,Km - Kohäsionsbruch im Stein, im Mörtel



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Rüthener Grünsandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtewechsel

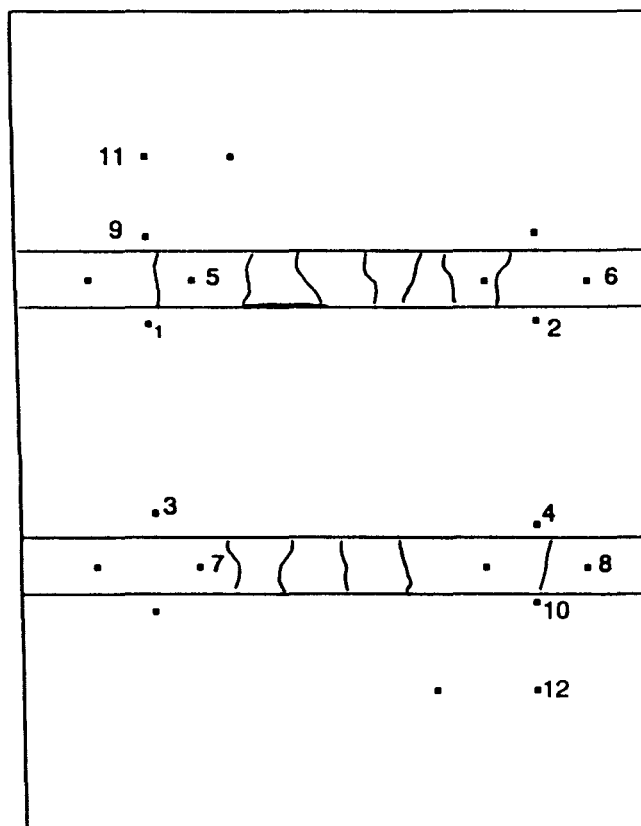
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Grünsandstein / HGZ

Herstellungsdatum: 6.04.92

Messkörper: G1

Klimakammer



3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

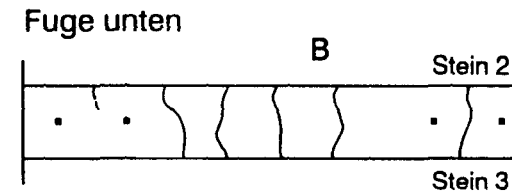
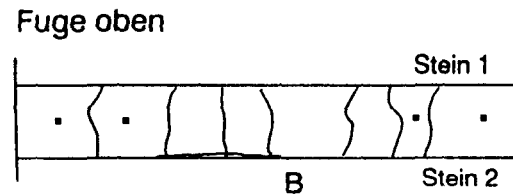
Prüfdatum: 22.10.92
Aufnahmedatum: 12.02.93

Messkörper: G-1

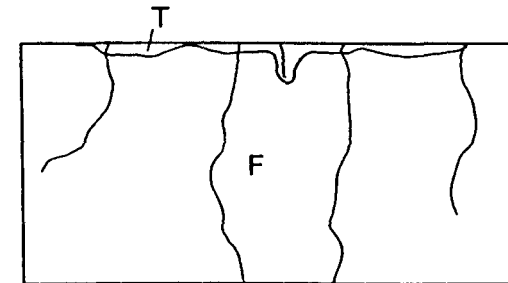
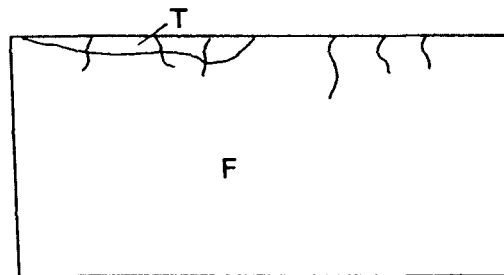
Stein/Mörtel: Grünsandstein/HGZ

A-22: G1 Grünsandstein - HGZ (Klimakammer)
A-22c: G1 Bruchbildaufnahme

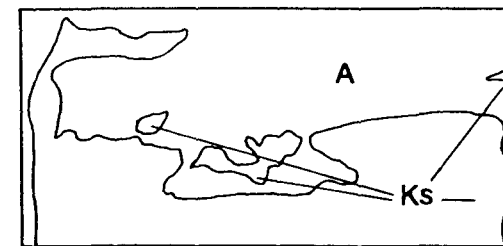
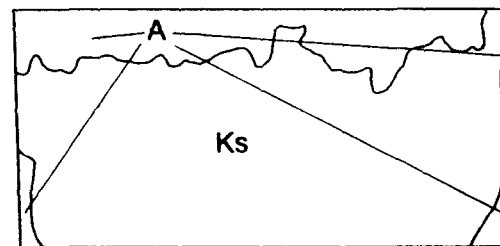
Ansicht:



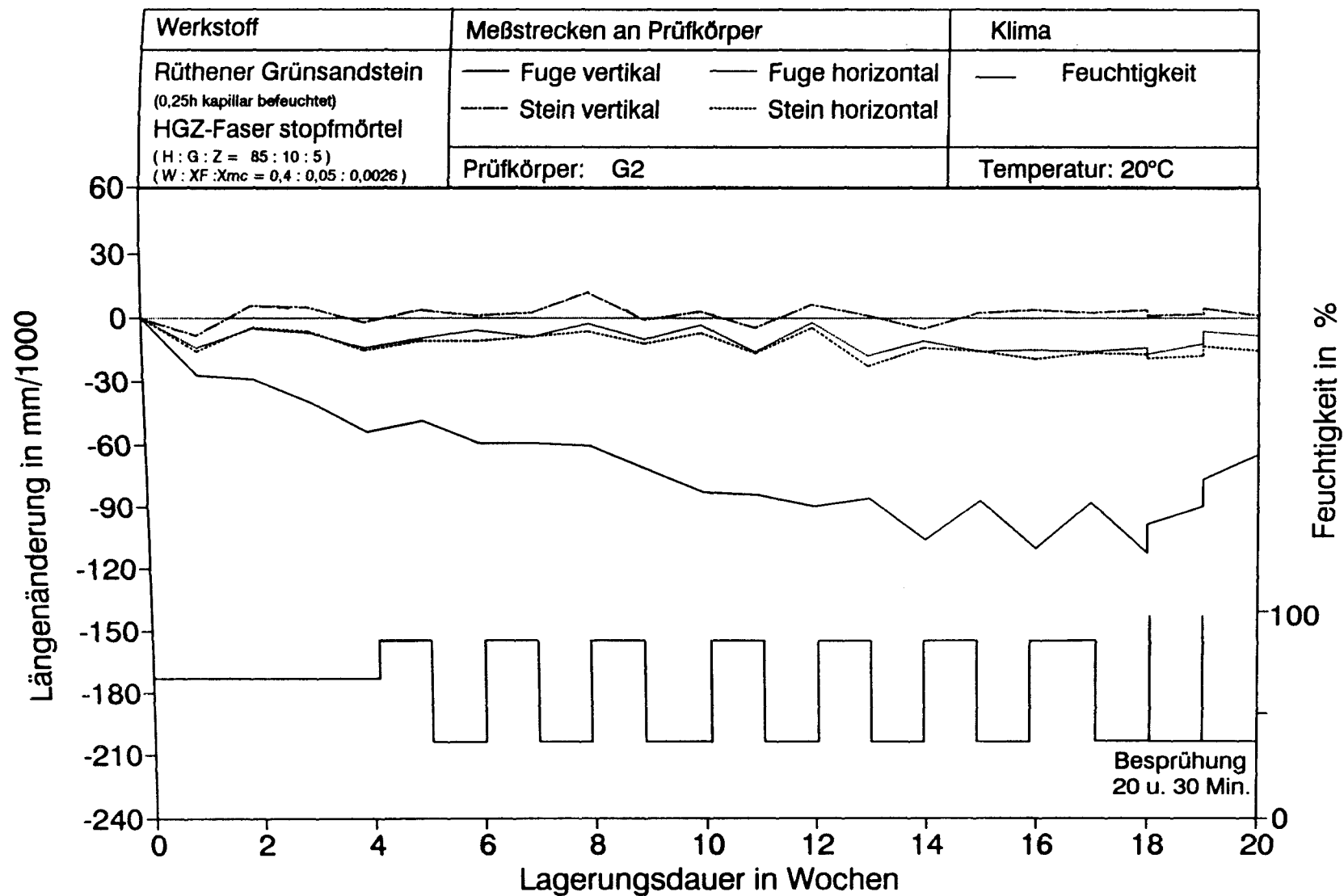
Aufsicht: Mörtel
"Trocken / Feucht"



Aufsicht: Mörtel
"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks - Kohäsionsbruch im Stein



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Rüthener Grünsandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtewechsel

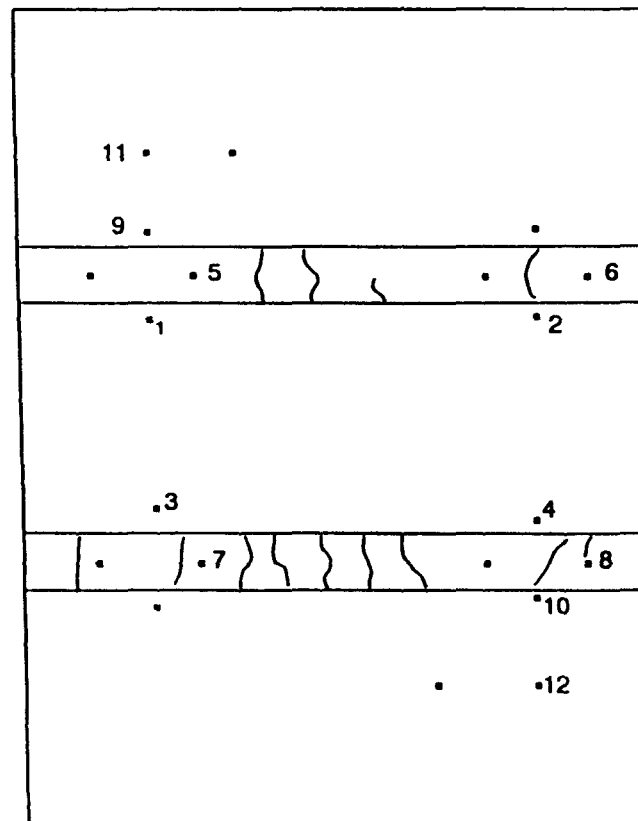
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Grünsandstein / HGZ

Herstellungsdatum: 6.04.92

Messkörper: G2

Klimakammer



A-23: G2 Grünsandstein - HGZ (Klimakammer)
A-23b: G2 Rißanalyse

3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 6.11.92

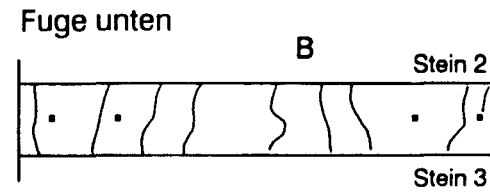
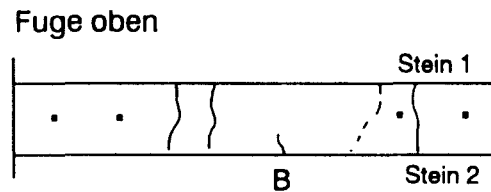
Aufnahmedatum: 12.02.92

Messkörper: G-2

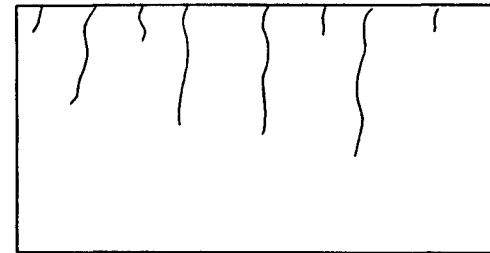
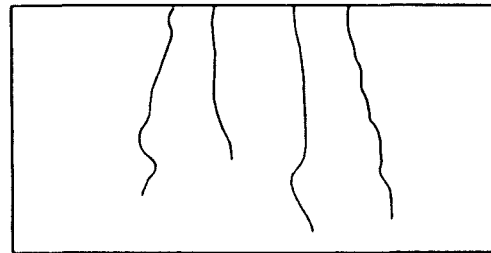
Stein/Mörtel: Grünsandstein/HGZ

A-23: G2 Grünsandstein - HGZ (Klimakammer)
A-23c: G2 Bruchbildaufnahme

Ansicht:

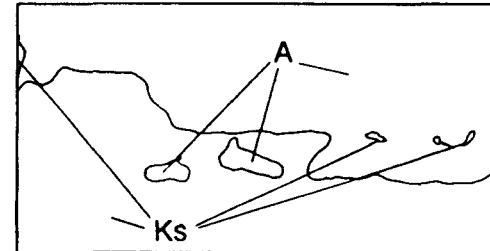
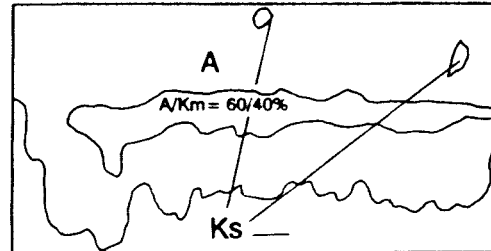


Aufsicht: Mörtel



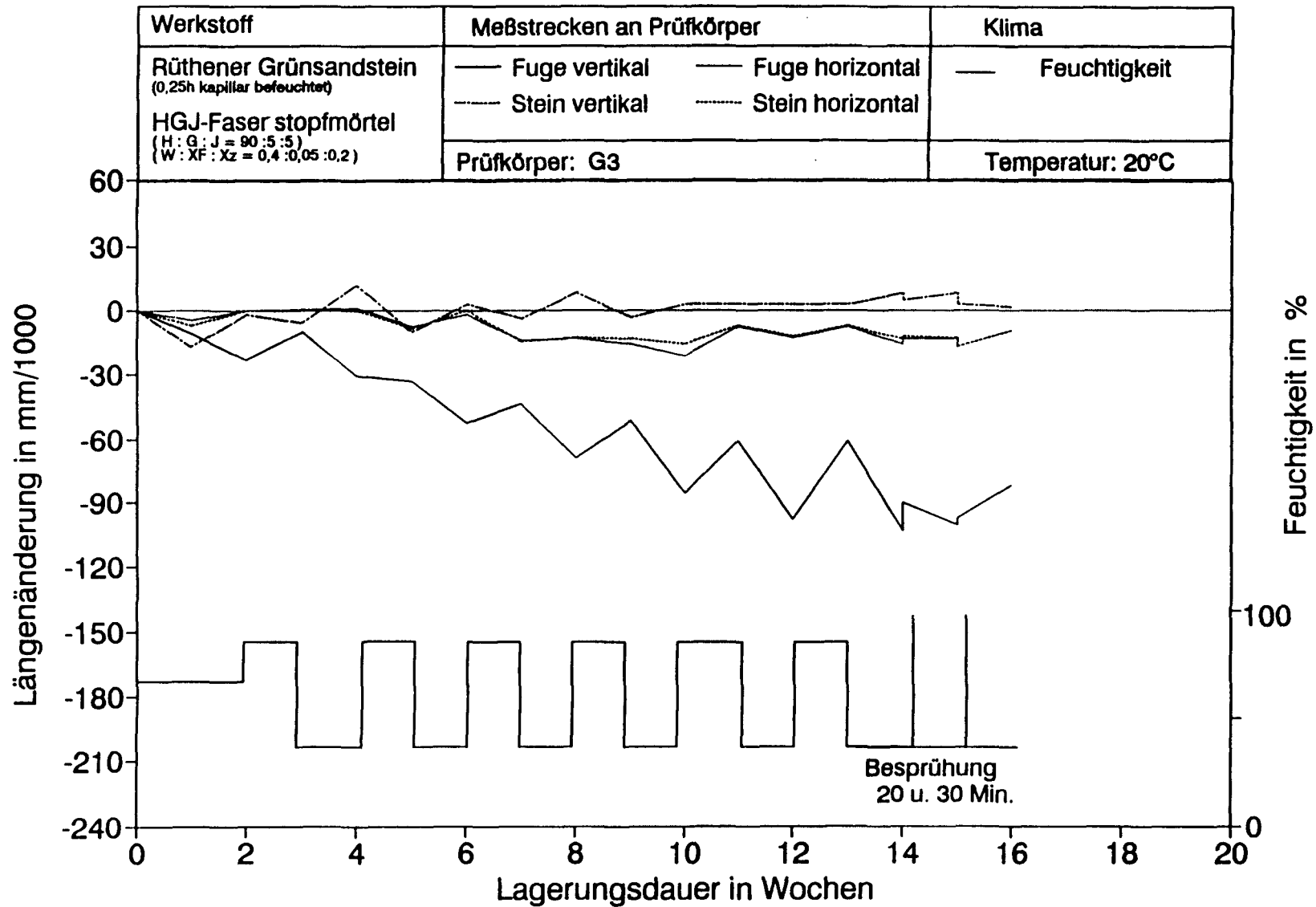
"Trocken / Feucht"

Aufsicht: Mörtel



"Adhäsion / Kohäsion"

Anmerkung: B - Bruch; F-Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks - Kohäsionsbruch im Stein; Km - Kohäsionsbruch im Mörtel



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Rüthener Grünsandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

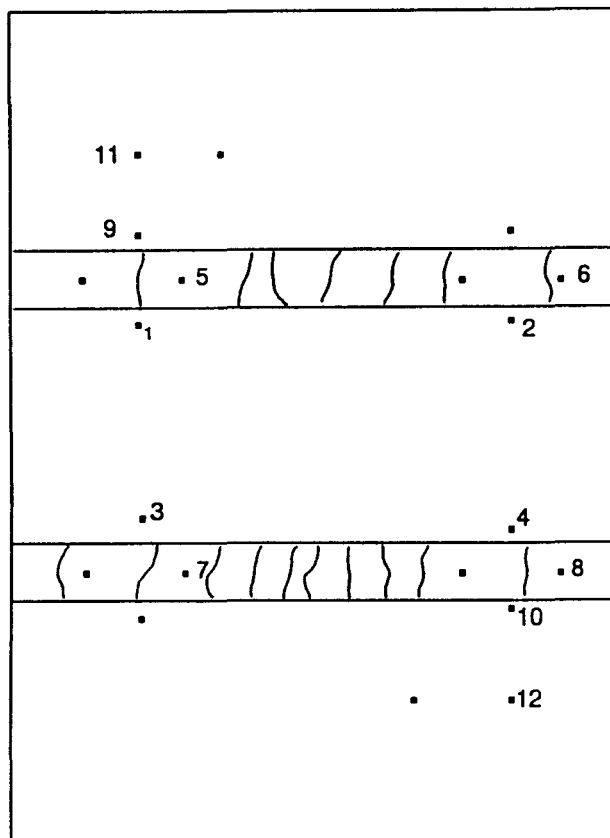
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Grünsandstein / HGJ

Herstellungsdatum: 5.05.92

Messkörper: G3

Klimakammer



3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 20.10.92

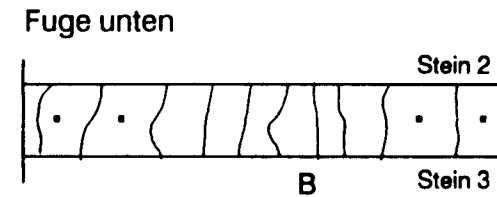
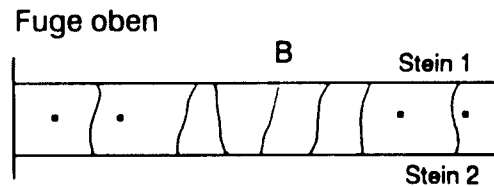
Aufnahmedatum: 9.02.93

Messkörper: G-3

Stein/Mörtel: Grünsandstein/HGJ

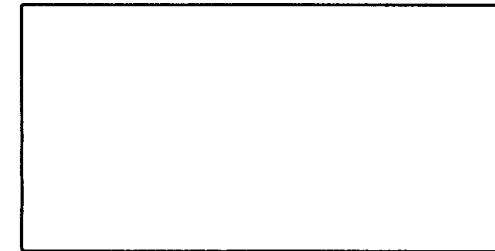
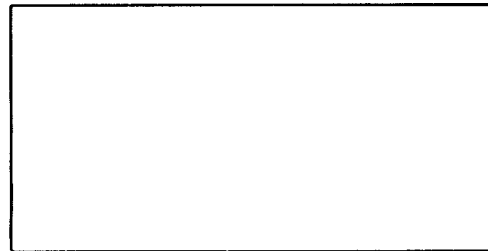
A-24: G3 Grünsandstein - HGJ (Klimakammer)
A-24c: G3 Bruchbildaufnahme

Ansicht:



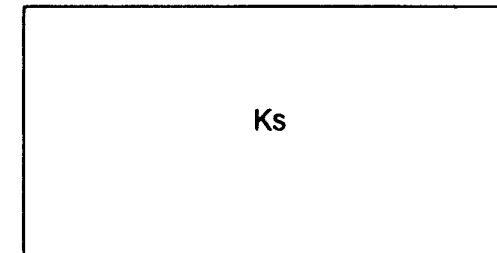
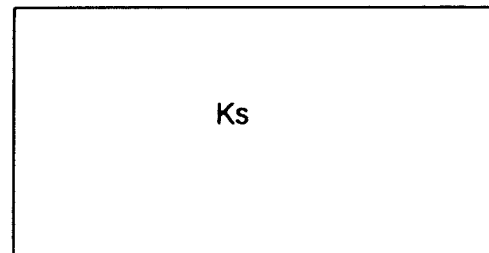
Aufsicht: Stein

"Trocken / Feucht"

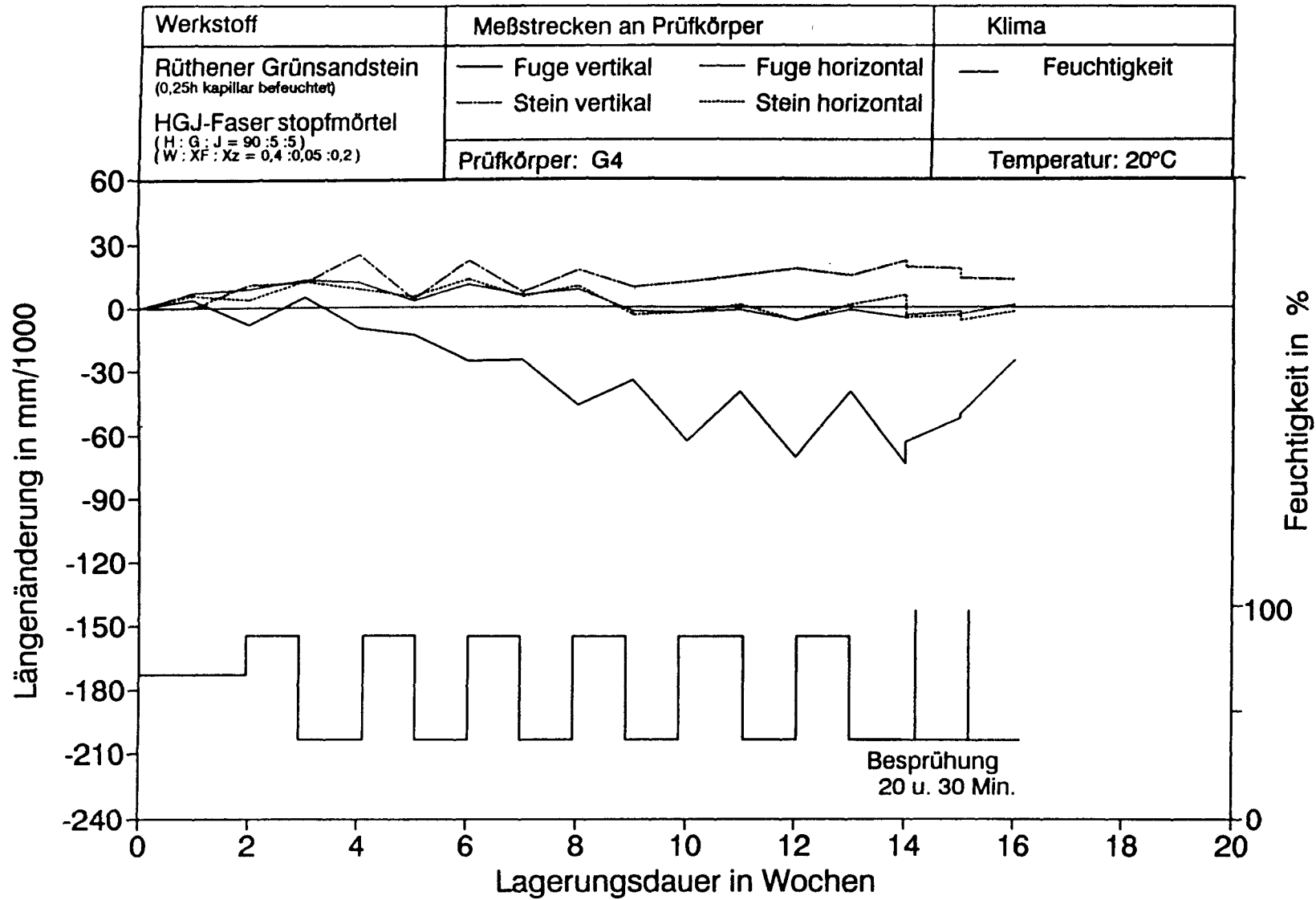


Aufsicht: Stein

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; T - Trocken; F - Feucht; A - Adhäsion; Ks - Kohäsionsbruch im Stein



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Rüthener Grünsandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

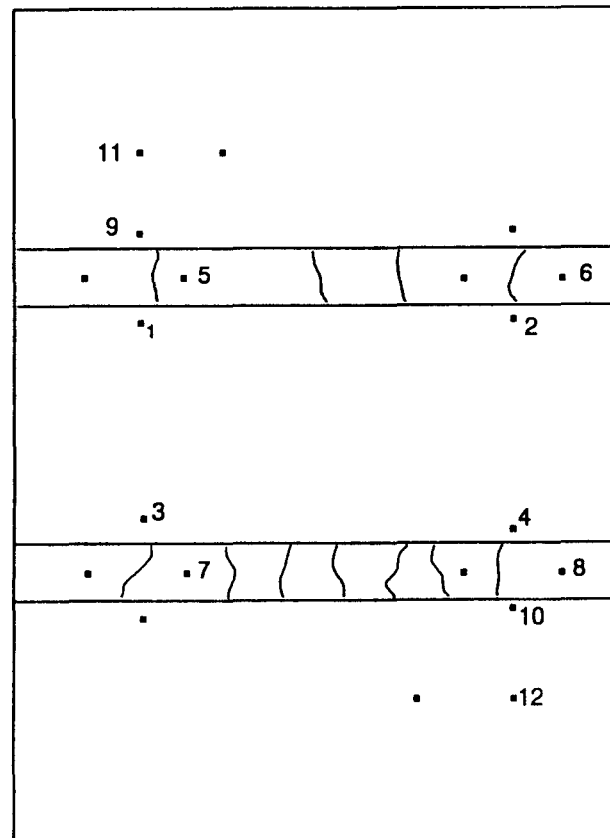
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Grünsandstein / HGJ

Herstellungsdatum: 5.05.92

Messkörper: G4

Klimakammer



3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 19.10.92

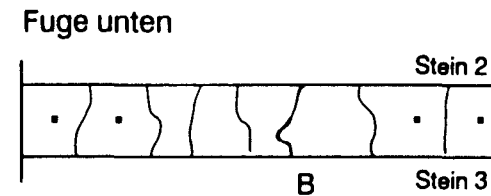
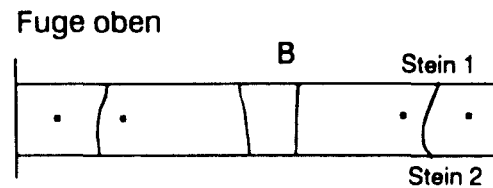
Aufnahmedatum: 9.02.93

Messkörper: G-4

Stein/Mörtel: Grünsandstein/HGJ

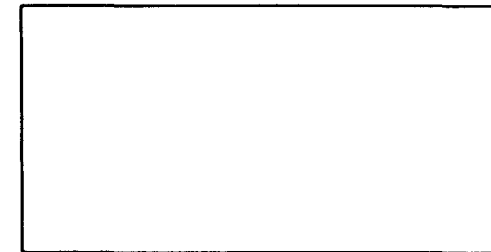
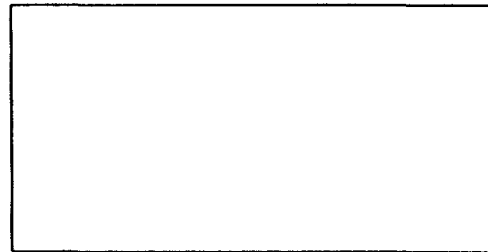
A-25: G4 Grünsandstein - HGJ (Klimakammer)
A-25c: G4 Bruchbildaufnahme

Ansicht:



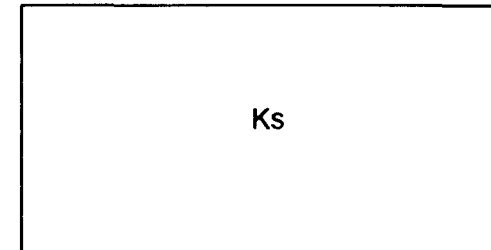
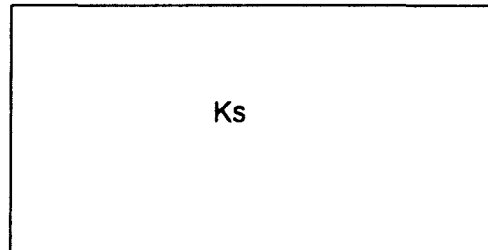
Aufsicht: Stein

"Trocken / Feucht"

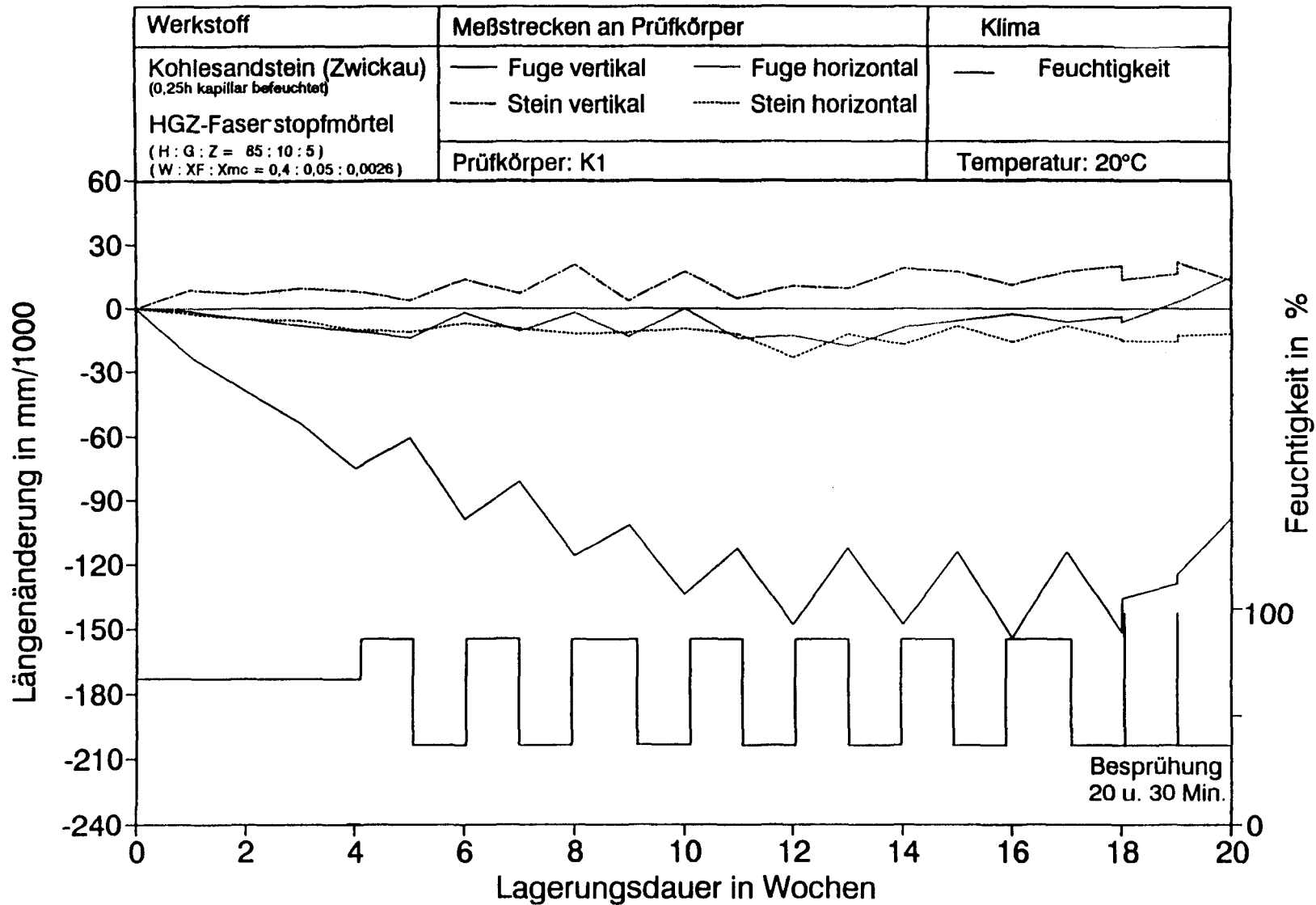


Aufsicht : Stein

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; T - Trocken; F - Feucht; A - Adhäsion; Ks - Kohäsionsbruch im Stein



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Zwickauer Kohlesandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

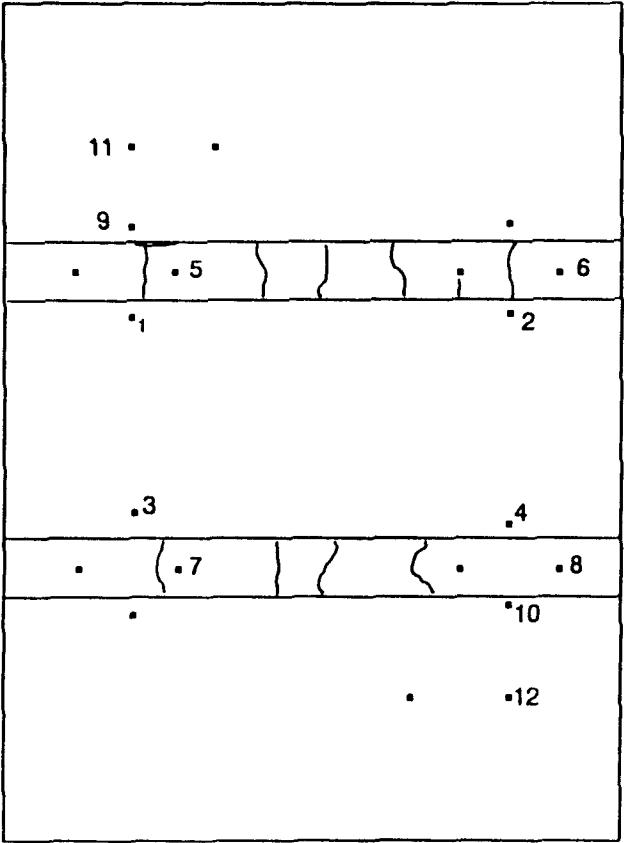
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Kohlesandstein / HGZ

Herstellungsdatum: 6.04.92

Messkörper: K1

Klimakammer



A-26: K1 Kohlesandstein - HGZ (Klimakammer)
A-26b: K1 Rißanalyse

3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 20.11.92

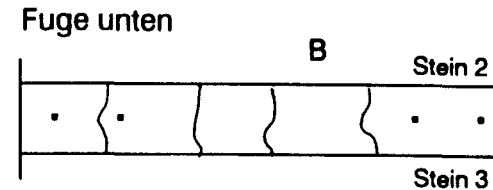
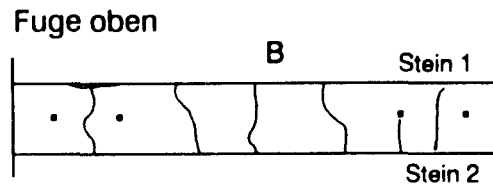
Aufnahmedatum: 12.02.93

Messkörper: K-1

Stein/Mörtel: Kohlesandstein/HGZ

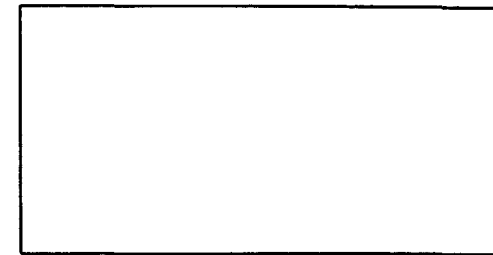
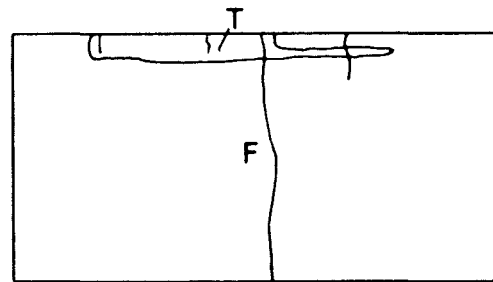
A-26: K1 Kohlesandstein - HGZ (Klimakammer)
A-26c: K1 Bruchbildaufnahme

Ansicht:



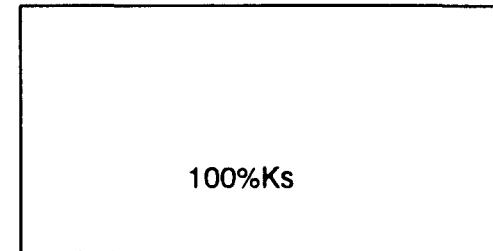
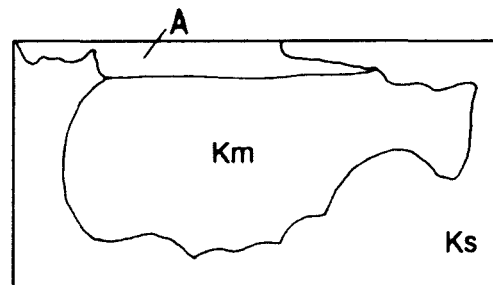
Aufsicht: Mörtel

"Trocken / Feucht"

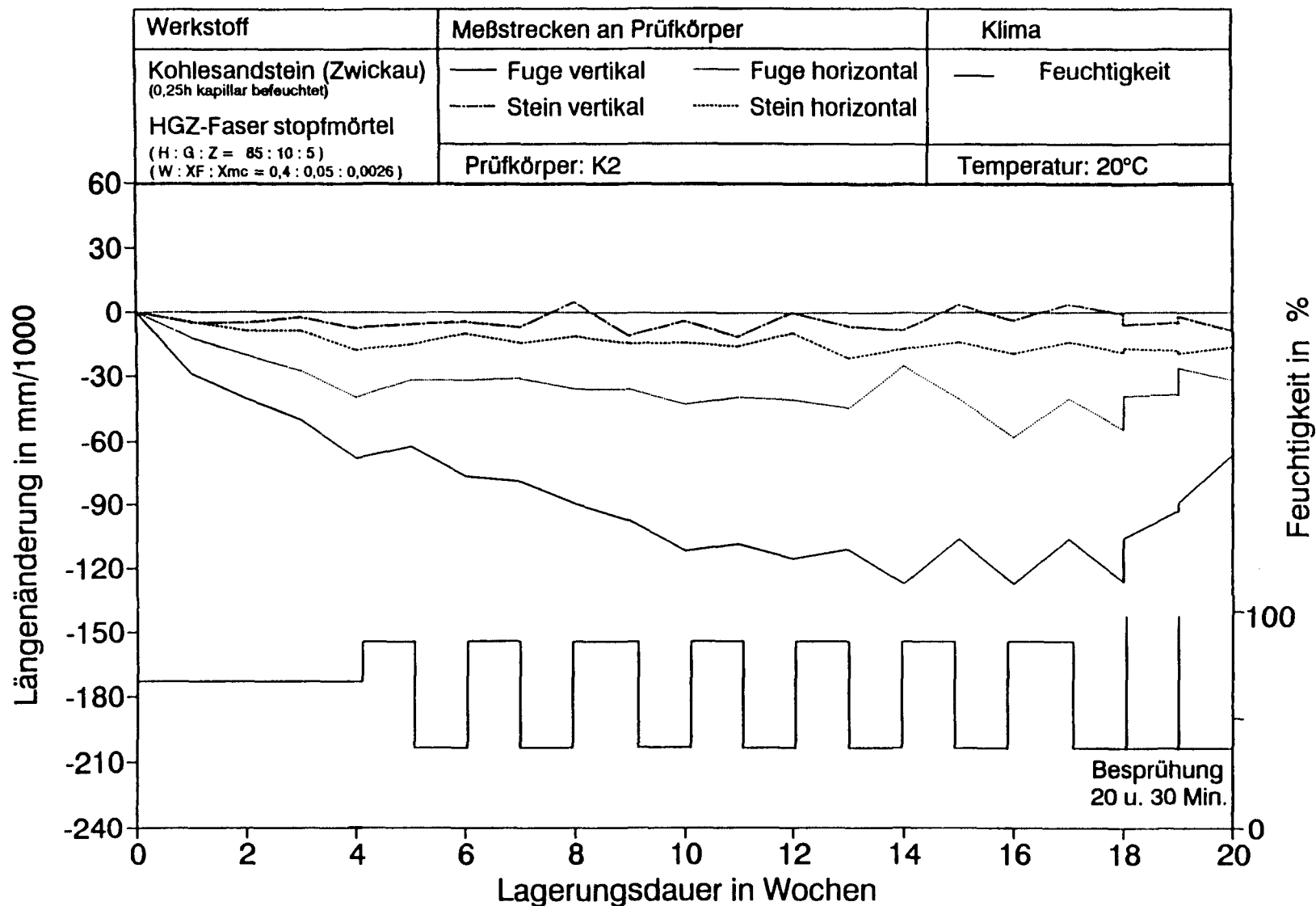


Aufsicht: Mörtel

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks - , Km - Kohäsionsbruch im Stein, im Mörtel



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an 3-Stein-Körper aus Zwickauer Kohlesandstein
im Klima 20/65,20/85 u.20/35 mit zeitlichen Feuchtwechsel

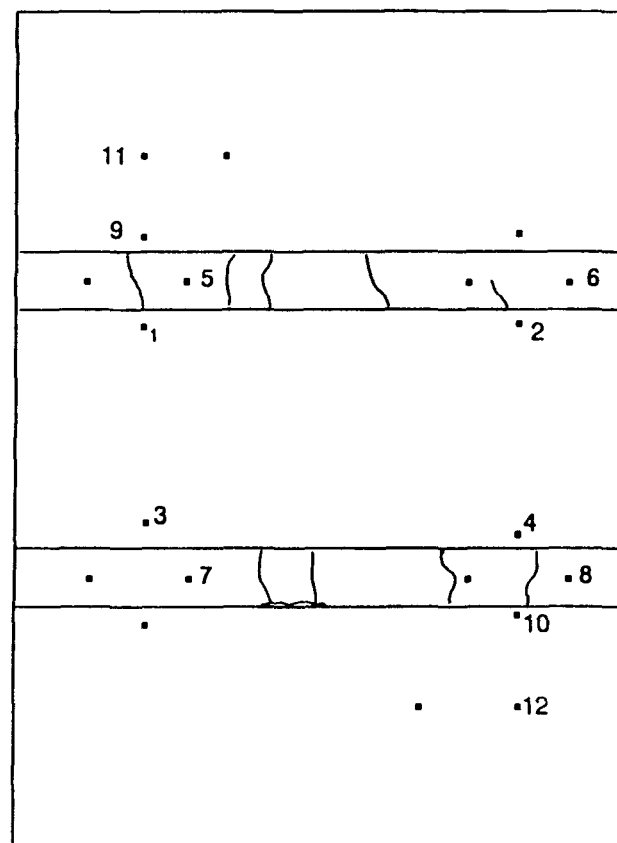
3-STEIN-KÖRPER: Fugenrissbreiten

Stein/Mörtel: Kohlesandstein / HGZ

Herstellungsdatum: 6.04.92

Messkörper: K2

Klimakammer



3-STEIN-KÖRPER: Bruchbild

Prüfdatum: 5.02.93

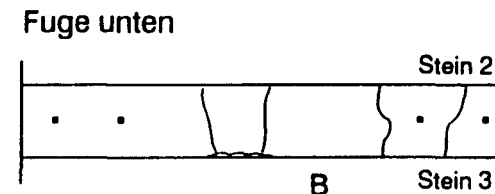
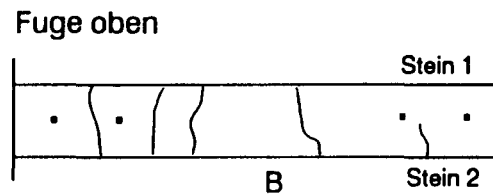
Aufnahmedatum: 12.02.93

Messkörper: K-2

Stein/Mörtel: Kohlesandstein/HGZ

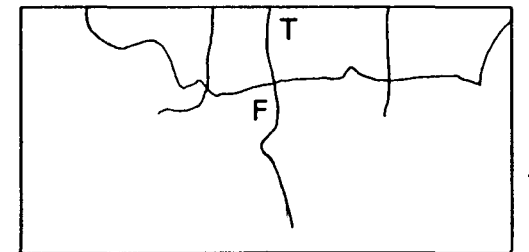
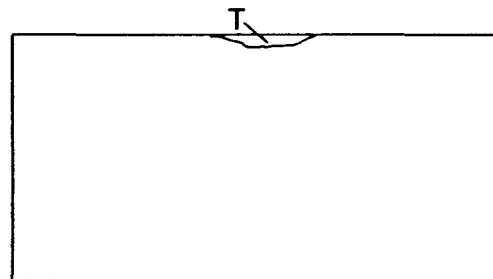
A-27: K2 Kohlesandstein - HGZ (Klimakammer)
A-27c: K2 Bruchbildaufnahme

Ansicht:



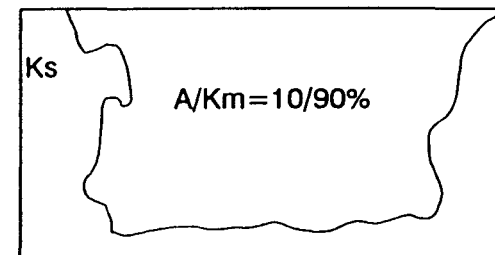
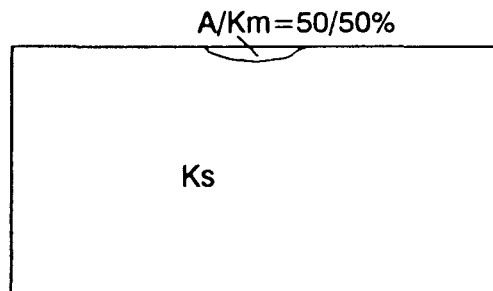
Aufsicht: Mörtel

"Trocken / Feucht"



Aufsicht: Mörtel / Stein

"Adhäsion / Kohäsion"



Anmerkung: B - Bruch; F - Feucht; T - Trocken; A - Adhäsion; Ks - ,Km - Kohäsionsbruch im Stein, im Mörtel